

УДК 533.6.011

НЕРАВНОВЕСНОЕ МОЛЕКУЛЯРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОКОЛО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ВХОДЕ В АТМОСФЕРУ МАРСА

В.А.Горелов, А.Ю.Киреев, С.В.Шиленков
Центральный Аэрогидродинамический Институт им. проф. Н.Е.Жуковского
г.Жуковский, Московская область, 140180, Россия
va_gorelov@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты разработки модели неравновесного излучения молекулярных компонентов CO, CN, C₂, NO в ударном слое при полете в атмосфере Марса. Для верификации моделей проведены экспериментальные исследования в электроразрядной ударной трубе ТЭР ЦАГИ. На основе разработанной кинетической и численной модели, основанной на 2-D полных уравнениях Навье-Стокса, проведена оценка лучистых тепловых потоков к критической точке аппарата Mars Probe и аппарата сегментально-конической формы. Для последнего также проведен оценочный расчет лучистого теплового потока в донной области для точки траектории V=6 км/с, H=60 км.

Abstract

The results of developing a model of nonequilibrium radiation of molecular components CO, CN, C₂, NO in the shock layer during the flight in the Martian atmosphere are presented. To verify the model, some experimental investigations are carried out in the Arc-Driven Shock Tube (ADST TsAGI). Relying on the developed kinetic and numerical model based on the 2-D full Navier-Stokes equations, the radiative heat fluxes are estimated at the stagnation point of the Mars Probe space vehicle and of the segmentally-conical space vehicle. The radiative heat fluxes in the base region of the segmentally-conical vehicle are also calculated for the trajectory point V=6 km/s, H=60 km.

Ключевые слова: неравновесные процессы, излучение, ударные волны, вход в атмосферу Марса

Введение

В данной работе представлены некоторые результаты исследований, проведенных в ЦАГИ в области изучения роли неравновесных физико-химических процессов при обтекании космических аппаратов, входящих в атмосферу Марса.

В работе [1] приведены результаты исследования особенностей процессов ионизации и предварительные данные по неравновесному молекулярному излучению за сильной ударной волной в смеси газов, моделирующей атмосферу Марса. В данной статье представлены следующие результаты:

- Выбор и разработка моделей неравновесного молекулярного излучения около космического аппарата (КА), входящего в атмосферу Марса.
- Данные по верификации моделей излучения в лабораторных экспериментах, проведенных в электроразрядной трубе.

- Результаты расчета неравновесных лучистых тепловых потоков в зонах торможения около поверхности космических аппаратов типа Mars Probe и сегментально – конической формы.
- Результаты оценочных расчетов лучистого теплового потока в донной области аппарата сегментально – конической формы.

Основная часть

При скоростях движения космического аппарата в Марсианской атмосфере $V_{\infty}=4-8$ км/с основной вклад в неравновесный радиационный поток к его лобовой поверхности вносит излучение в молекулярных системах полос $\text{CO}(4+)$, $\text{CN}(\text{violet})$, $\text{C}_2(\text{Swan})$, $\text{NO}(\gamma)$. Основной проблемой, возникающей при численном моделировании течений неравновесного излучающего газа является недостаток надежных данных по кинетике физико-химических превращений, протекающих в высокотемпературных газовых смесях. В [1] на основе верификационного трубного эксперимента, проведенного на ТЭР ЦАГИ, предложены кинетические схемы, достаточно хорошо описывающие особенности неравновесных процессов в газовых смесях, моделирующих по составу атмосферу Марса. Эти кинетические модели используются в данной работе для оценки неравновесных лучистых тепловых потоков к поверхности аппаратов различной формы, совершающих полет в Марсианской атмосфере, численное моделирование обтекания которых проведено на базе 2-D полных уравнений Навье-Стокса с учетом неравновесных физико-химических процессов, протекающих в высокотемпературной газовой смеси ($97\%\text{CO}_2-3\%\text{N}_2$).

Кинетическая схема включает в себя:

1. Многотемпературную модель колебательной релаксации, т.е. колебательная релаксация молекул CO_2 , CO , NO , N_2 , CN , C_2 характеризуется собственными для каждой молекулы температурами, отличными от температуры поступательных степеней свободы T .
2. Колебательно-диссоциационное взаимодействие (КДВ). Для описания КДВ используются модели: CO_2 – модель Н.М.Кузнецова, для двухатомных молекул – модель Тринора-Маррона $\text{CVDV}(U=D/3)$.
3. Диссоциацию и обменные реакции.
4. Ионизацию и реакции обмена зарядом.

Используемые в численной модели времена колебательной релаксации и константы скоростей реакций подробно обсуждаются в работе [2].

Для расчета неравновесного молекулярного излучения необходимо знать заселенности электронно-колебательных возбужденных состояний молекул, ответственных за генерацию излучения в молекулярных системах полос. В расчетах принимается, что распределение заселенности электронно-возбужденных состояний молекул по колебательным уровням является больцманновским с температурой, соответствующей колебательной температуре основного электронного состояния. Вращательная температура молекул принимается равной поступательной температуре. Заселенности электронных состояний молекул, определяющих излучение в исследуемых системах молекулярных полос находятся из решения уравнений баланса, учитывающих формирование заселенности уровня в ходе: прямых и ступенчатых процессов возбуждения тяжелыми частицами и электронами; резонансных процессов обмена энергией между возбужденными молекулами и молекулами в основном электронном состоянии; радиационного обеднения состояния.

Излучение CO(4+).

Молекулярное излучение в системе полос CO(4+) формируется в переходе CO(A¹Π→X¹Σ). Состояние CO(A¹Π)≡CO(A) заселяется (разрушается) в ходе основных реакций, приведенных в Таблице 1:

Таблица 1.

Реакция	κ _f = A · T ^B · exp(-C/T) (см ³ /моль с) или τ (с)			Источник
	A	B	C	
1. CO(A)+M=CO(a)+M	6.00·10 ¹³	0	0	[1]
2. CO(A)+e=CO(a)+e	4.00·10 ¹⁵	0	0	[1]
3. N ₂ (A)+CO=CO(A)+N ₂	1.10·10 ¹⁰	0	0	[1]
4. CO+M=CO(A)+M	4.50·10 ²	2.86	93000	[1]
5. CO+e=CO(A)+e	4.00·10 ¹¹	0.93	93000	[1]
6. CO(A)→CO+hv	τ=3.03·10 ⁻⁸			[3]

Излучение CN(violet).

Молекулярное излучение в системе полос CN(violet) формируется в переходе CN(B²Σ⁺→X²Σ⁺). Состояние CN(B²Σ⁺)≡CN(B) заселяется (разрушается) в ходе основных реакций, приведенных в Таблице 2:

Таблица 2.

Реакция	κ _f = A · T ^B · exp(-C/T) (см ³ /моль с) или τ (с)			Источник
	A	B	C	
1. CN(X)+CO(X,v>12)=CN(B)+CO	6.00·10 ¹³	0	0	[1]
2. CN(X)+N ₂ (X,v>11)=CN(B)+N ₂	6.00·10 ¹³	0	0	[1]
3. CN+M=CN(B)+M	2.24·10 ¹⁰	0.5	37000	[1]
4. CN+e=CN(B)+e	7.80·10 ¹³	0.5	37000	[4]
5. CN(B)→CN(X)+hv CN(B)→CN(A)+hv	τ=6.55·10 ⁻⁸			[3]

Излучение C₂(Swan).

Молекулярное излучение в системе полос C₂(Swan) формируется в переходе C₂(d³Π_g→a³Π_u). Состояние C₂(d³Π_g)≡C₂(d) заселяется (разрушается) в ходе основных реакций, приведенных в Таблице 3:

Таблица 3.

Реакция	κ _f = A · T ^B · exp(-C/T) (см ³ /моль с) или τ (с)			Источник
	A	B	C	
1. C ₂ +M=C ₂ (d)+M	2.90·10 ¹⁴	0.15	28800	[4]
2. C ₂ +e=C ₂ (d)+e	7.82·10 ¹⁵	0.15	28800	[4]
3. C ₂ (d)→C ₂ (a)+hv	τ=3.57·10 ⁻⁸			[3]

Излучение NO(γ).

Молекулярное излучение в системе полос NO(γ) формируется в переходе NO($A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$). Состояние NO($A^2\Sigma$) \equiv NO(A) заселяется (разрушается) в ходе основных реакций, приведенных в Таблице 4:

Таблица 4.

Реакция	$k_f = A \cdot T^B \cdot \exp(-C/T)$ ($\text{см}^3/\text{моль} \cdot \text{с}$, $\text{см}^6/\text{моль}^2 \cdot \text{с}$) или τ (с)			Источник
	A	B	C	
1. NO(A)+M=NO+M	$5.20 \cdot 10^{12}$	0.50	0	[5]
2. NO+e=NO(A)+e	$7.20 \cdot 10^{13}$	0	63500	[6]
3. N+O+M=NO(A)+M	$9.1 \cdot 10^{16}$	-1.24	0	[7]
4. N+O=NO(A)	$2.1 \cdot 10^{10}$	-1.40	0	[7]
5. N ₂ (A)+NO=NO(A)+N ₂	$6.00 \cdot 10^{13}$	0	0	[8]
6. CO(a)+NO=NO(A)+CO	$1.40 \cdot 10^{14}$	0	0	[8]
7. NO(A) \rightarrow NO+h ν	$\tau=2.00 \cdot 10^{-7}$			[3]

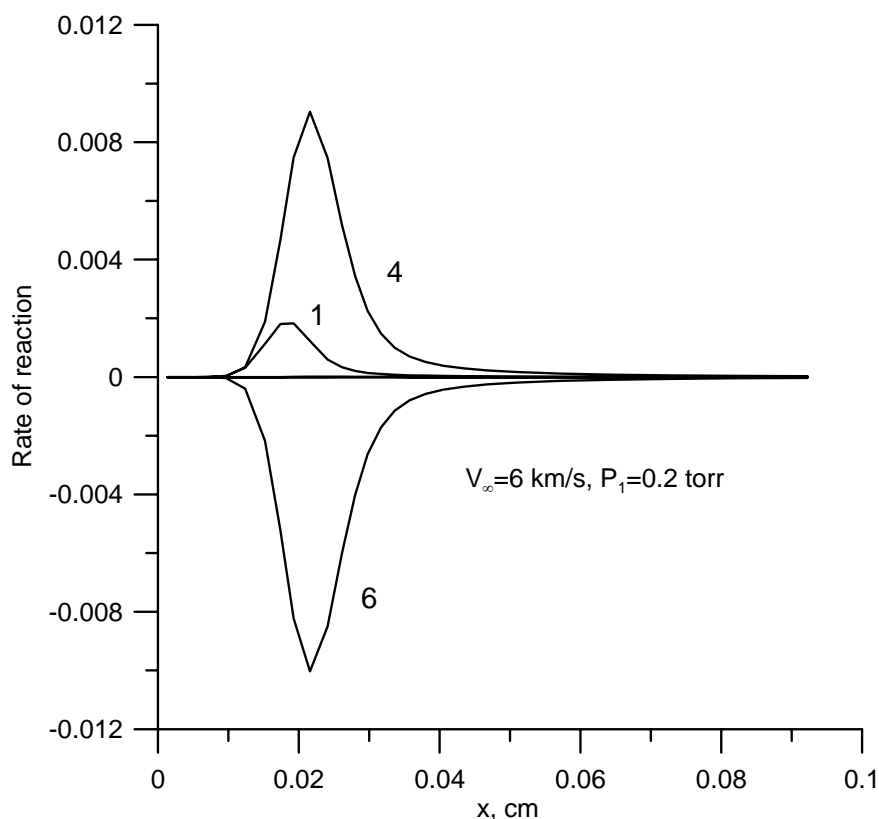


Рис.1. Скорости реакций образования (разрушения) электронно- возбужденной молекулы CO($A^1\Pi$). $V_\infty = 6$ км/с, $P_1 = 0.2$ тор.

На рис.1-2 представлены скорости реакций (разница скоростей прямой и обратной реакций $(dc/dx)_j$), образования (разрушения) излучающих состояний молекул CO($4+$) (рис.1) и CN(violet) (рис.2) в реакциях под номером j (приведены в Таблицах 1 и 2) в зависимости от расстояния по релаксационной зоне за фронтом ударной волны.

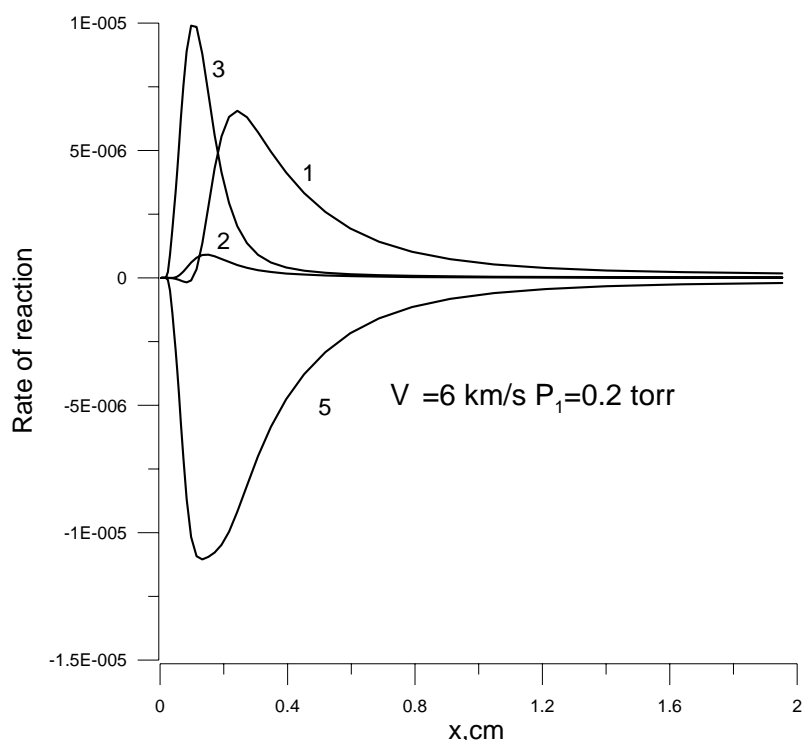


Рис.2. Скорости реакций образования (разрушения) электронно- возбужденной молекулы $CN(B^2\Sigma^+)$. $V_S = 6$ км/с, $P_1 = 0.2$ тор.

Данные, показанные на рис.1,2 получены для скорости ударной волны $V_S = 6$ км/с и начальном давлении $P_1 = 0.2$ тор. Несложно заметить, что основной вклад в образование (разрушение) электронно- возбужденного состояния $CO(A^1\Pi)$ при этих условиях течения вносят: реакции 1-(возбуждение из метастабильного состояния $CO(a)$), 4 – прямое возбуждение тяжелыми частицами и 6 – радиационное обеднение состояния. Вклад других реакций на этом режиме течения несущественен. Рис.2 демонстрирует важность учета резонансных процессов образования состояния $CN(B^2\Sigma^+)$ (реакции 1-2), которые, наряду с реакциями прямого заселения тяжелыми частицами (реакция 3) и радиационным обеднением состояния (реакция (5-6)) определяют заселенность электронно- возбужденного состояния.

Верификация кинетики излучения.

Верификационные эксперименты по исследованию особенностей неравновесного излучения в смеси газов, моделирующей марсианскую атмосферу, проводились в электроразрядной трубе ЦАГИ. Некоторые конструктивные особенности установки, ее рабочие параметры, методика экспериментов представлены в работах [1,9,10]. Канал низкого давления имел длину 5м и диаметр 57мм. Основная часть экспериментов проводилась с газовой смесью, содержащей CO_2 (96%), N_2 (3%) и O_2 (1%) при начальном давлении в канале $P_1 = 0.2(\pm 1\%)$ тор. Скорость ударной волны в канале измерялась с точностью $\sim 2\%$. Продолжительность течения газа, сжатого ударной волной, в сечении канала, в котором проводилась регистрация излучения при скорости ударной волны 4-9 км/с, составляла 7-3 мкс, соответственно. Оптическая система позволяла регистрировать излучение газа в направлении, перпендикулярном оси канала ударной трубы, с пространственным разрешением вдоль оси канала ТЭР 0.1 мм. При спектральных исследованиях использовалась рутинная (обычная) методика с использованием многоканального спектрометра и монохроматора. Приемниками излучения служили фотоумножители. Сигналы с фотоумножителей регистрировались цифровым осциллографом с разрешением 0.1 мкс.

Неравновесное излучение CN(violet)

Результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных по неравновесному излучению в молекулярной системе CN (violet) в диапазоне изменения скорости ударной волны $V_s = 5.5-9$ км/с представлены в [1]. Было обнаружено удовлетворительное согласие между расчетными и экспериментальными данными по профилям неравновесного излучения в системе CN и зависимости максимума неравновесного излучения от скорости ударной волны в рассмотренном диапазоне ее изменения. Расчетные данные сравнивались также с экспериментальными результатами работы [11]. На рис.3 представлено сравнение расчетного спектра излучения (сплошные кривые) с измерениями (символы - \square), приведенными в работе [11] для интенсивности излучения системы полос CN(violet) за фронтом сильной ударной волны ($V_s=7.62$ км/с, $P_1=0.25$ тор), движущейся в смеси (30%CO₂-70%N₂). Рис.3 показывает неплохое совпадение расчетных данных с экспериментальными.

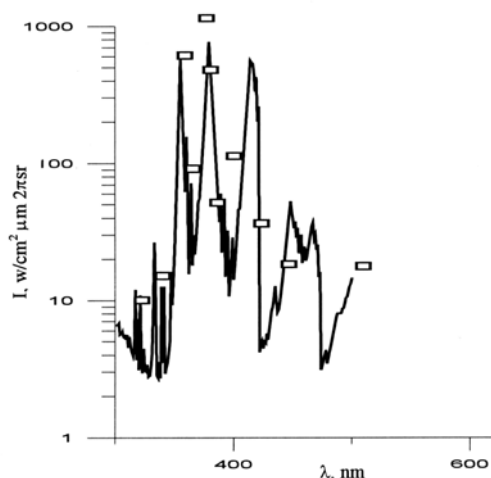


Рис. 3. Спектр неравновесного излучения CN(violet) за фронтом ударной волны $V_s=7.62$ км/с, $P_1=0.25$ тор, (30% CO₂-70% N₂). Кривая- расчет, \square - измерения работы [11].

Неравновесное излучение в системе CO(4+)

Неравновесное излучение в молекулярной системе CO(4+) вносит основной вклад в неравновесное излучение газа за фронтом ударной волны. К сожалению, аппаратные возможности не позволили в экспериментах провести измерение неравновесного излучения в спектральном интервале, соответствующем максимуму излучения в системе CO(4+) ($\lambda = 150$ мкм). Поэтому сравнение результатов расчетов и эксперимента проводилось на длине волны $\lambda = 200 \pm 3.4$ нм. На рис.4 показано сравнение профилей неравновесного излучения, измеренных в спектральных интервалах 200 ± 3.4 нм (CO(4+)), 388 ± 1.3 нм (CN(violet)) и 515 ± 1.3 нм (C₂, Swan). Скорость ударной волны $V_s=7.3$ км/с, начальное давление газовой смеси в канале ТЭР $P_1 = 0.2$ тор. По оси абсцисс – время в μ s с момента прихода в сечение регистрации излучения фронта ударной волны. Видно, что помимо большого различия в интенсивности неравновесного излучения в системах CO(4+), CN и C₂ наблюдается различие между временем достижения пиковых значений излучения в CO(4+) и в системах CN и C₂

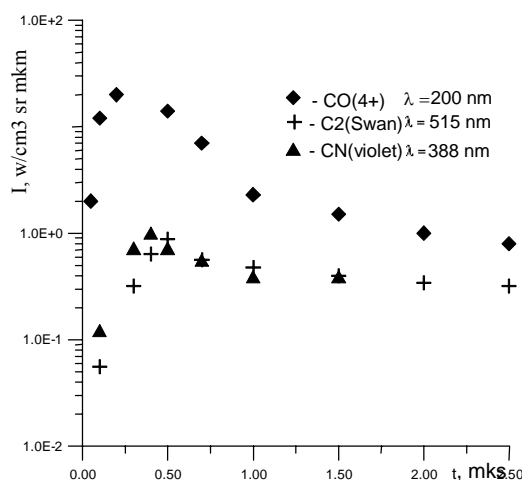


Рис.4. Измеренные профили распределения интенсивности неравновесного излучения за фронтом ударной волны $V_s=7.3$ км/с, $P_1=0.2$ тор.

◆- CO(4+), ▲- CN(violet), + - C₂(Swan).

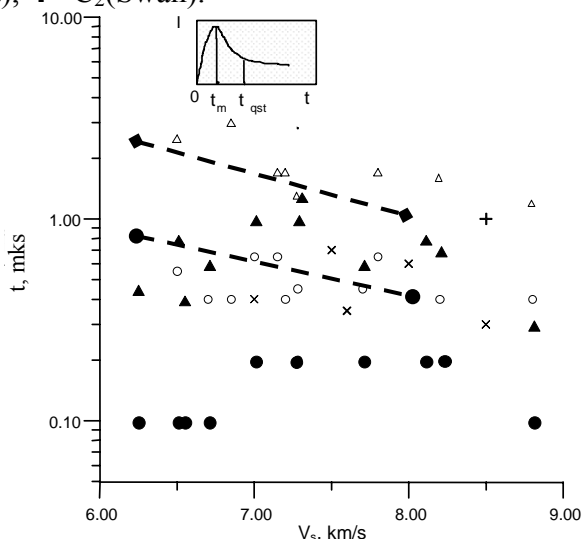


Рис.5. Измеренные и расчетные зависимости временных характеристик неравновесного излучения CO(4+) и CN(violet) за фронтом ударной волны от ее скорости. $P_1=0.2$ тор. (t_m - время достижения пика, t_{qst} – время выхода на квазистационарные значения).

Обозначения: - измерения работы [11] :× - t_m CN(violet); + - t_{qst} CN(violet). Данная работа: измерения: ◄ - t_m CO(4+); ℓ - t_{qst} CO(4+); Δ - t_{qst} CN(violet); O - t_m CN(violet), расчет :кривые: ◆---◆ - t_{qst} CN(violet), - ●---● - t_m CN(violet).

На рис.5 показаны зависимости временных характеристик неравновесного пика излучения (τ_m – времена достижения максимума излучения и τ_{qs} - характерная длительность пика неравновесного излучения) для излучения CO(4+) при $\lambda = 200$ нм и излучения в системе CN (violet), измеренные в экспериментах, проведенных в ТЭР. На этом же рисунке показаны результаты аналогичных измерений, представленные в работе [11], и результаты определения τ_m и τ_{qs} в численных расчетах излучения CN. Видно, что измеренные значения τ_m и τ_{qs} для CN согласуются с данными [11], полученными для смеси CO₂+ N₂ (при CO₂ -30%, N₂ -70%) и результатами расчетов. Но временные характеристики пика неравновесного излучения CO(4+) отличаются.

Времена τ_m очень малы (0.1-0.2 мкс), они находятся в пределах неопределенности, связанной с дискретной системой регистрации сигнала 0.1 мкс. Длительность пика неравновесного излучения CO(4+) также очень мала. Наблюдается максимум времени τ_{qs} при

$V_s \approx 7-8$ км/с. Отметим, что характерному времени нарастания 0.1 мкс соответствует расстояние $X \approx 3\lambda_\infty$, где λ_∞ - свободная длина пробега молекул перед фронтом ударной волны. Следовательно, максимальная генерация излучения CO(4+) может проходить в зоне “структуры” ударной волны с “термической неравновесностью”. Поэтому использование модели прямой ударной волны (без учета высокоэнергетических столкновений в зоне фронта волны) могут давать заниженные значения интенсивности неравновесного излучения CO(4+).

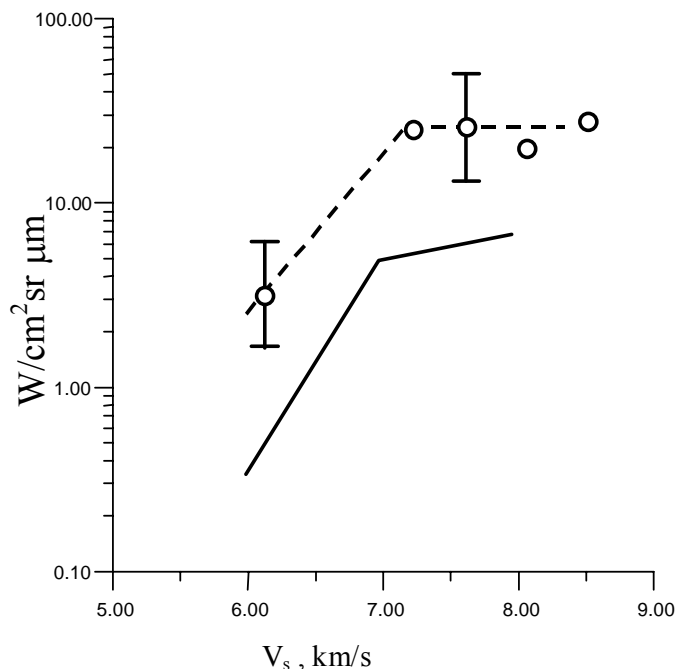


Рис.6. Зависимость пиковых значений потока лучистой энергии CO(4+) за фронтом ударной волны от ее скорости ($P_1=0.2$ тор). Кривая- расчет, точки –эксперимент.

На рис.6 показана зависимость интенсивности излучения, регистрируемого измерительной системой при экспериментах в ТЭР в зависимости от скорости V_s и соответствующий численный расчет с использованием вышепредставленной кинетики излучения в модели прямой ударной волны. Видно, что численный расчет дает заниженные значения в максимуме неравновесного пика.

Неравновесное излучение в системе C₂(Swan)

На рис.7 показан результат сравнения численного расчета зависимости максимальной интенсивности неравновесного излучения в молекулярной системе C₂ (Swan) ($\lambda \sim 585$ nm) от скорости прямой ударной волны ($V_s = 6-8$ км/с) с данными эксперимента в ТЭР. Видно, что упрощенная модель неравновесного излучения C₂ (Таблица 3) не обеспечивает удовлетворительного согласия с экспериментом, особенно при $V_s \geq 7$ км/с. Требуется дополнительное изучение особенностей кинетики образования и возбуждения молекулы C₂ в рассматриваемых условиях. Однако, учитывая относительно небольшой вклад излучения C₂ в суммарную интенсивность излучения за ударной волной в марсианской атмосфере [1], на данном этапе исследований улучшение кинетики излучения C₂ не проводилось.

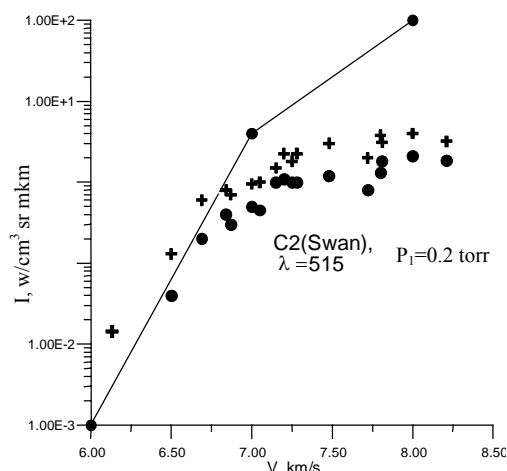


Рис.7. Зависимость пиковых и квазистационарных значений интенсивности излучения $C_2(\text{Swan})$ за фронтом ударной волны от ее скорости ($P_1=0.2$ тор). Кривая- расчет, $+$ - измерения I_{qst} ; \bullet - измерения I_m

Численное моделирование течения в вязком ударном слое

Изучение эмиссии гиперзвукового вязкого ударного слоя было выполнено при числовом решении уравнений Навье- Стокса. Базовая кинетическая модель адекватна модели, используемой в расчетах неравновесных процессов за сильной ударной волной. Рассматривалась многокомпонентная смесь, описанная выше. Коэффициенты переноса были рассчитаны по формулам Уилки и Масона-Саксена. При этом использовался потенциал Ленарда-Джонса. При решении задачи на ударной волне приняты обобщенные условия Рэнкина-Гюгонио, условия неприлипания, локальный баланс теплоты, различные условия каталитичности и равновесное состояние $T_v = T$ на стенке. Использовался полностью неявный метод интегро-интерполяции. Решение нелинейных уравнений сетки осуществлялось модифицированным методом Ньютона – Рафсона. Решение лианеризованных систем уравнений сетки было сделано LU-разложением с предварительной нумерацией неизвестных в соответствии с концепцией правил площадей. Более полное описание вычислительного метода расчета представлено в [12].

Результаты численных расчетов.

Расчет неравновесных радиационных тепловых потоков был проведен для двух сценариев входа в атмосферу Марса.

1. Определялись конвективный и неравновесный радиационный тепловые потоки для условий критической точки аппарата Mars express(probe A) с носовым радиусом затупления 0.38 м по траектории его полета в диапазоне высот $H = 75 - 40$ км. (в предположении нулевого угла атаки).

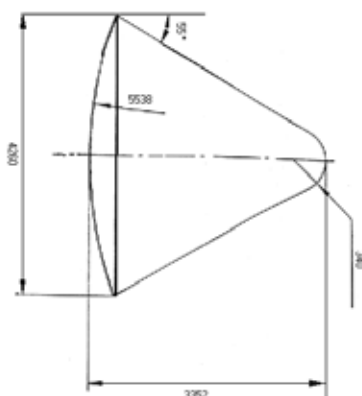


Рис.8. Аппарат сегментально- конической формы.

2. Рассматривались условия полета в атмосфере Марса (для маневра Aerocapture) аппарата сегментально-конической формы. Его геометрические параметры показаны на рис.8. Эта форма соответствует упрощенному варианту КА. Траектория движения КА в маневре Aerocapture представлена на рис.9. В работе проведен расчет лучистого теплового потока в критической точке КА для высот полета $H=60, 50, 40$ и 32 км. Для высоты полета 60 км с использованием программы расчета интенсивности излучения, разработанной С.Т. Суржиковым [13], также получены оценочные значения распределения лучистого теплового потока в донной области КА.

На рис.10 показан расчетный спектр излучения ударного слоя около критической точки для условий полета Mars Probe A на высоте $H = 53$ км, а на рис.11 зависимость неравновесного лучистого теплового потока в критической точке от высоты полета. Пунктирной кривой показан результат соответствующего расчета равновесного потока по приближенному соотношению М.Таубера и К.Саттона [14].

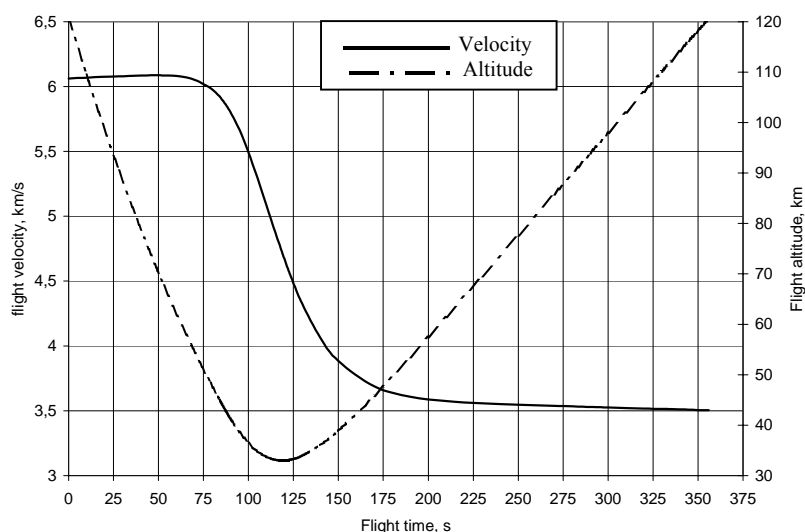


Рис.9. Траектория входа в атмосферу Марса аппарата сегментально- конической формы.

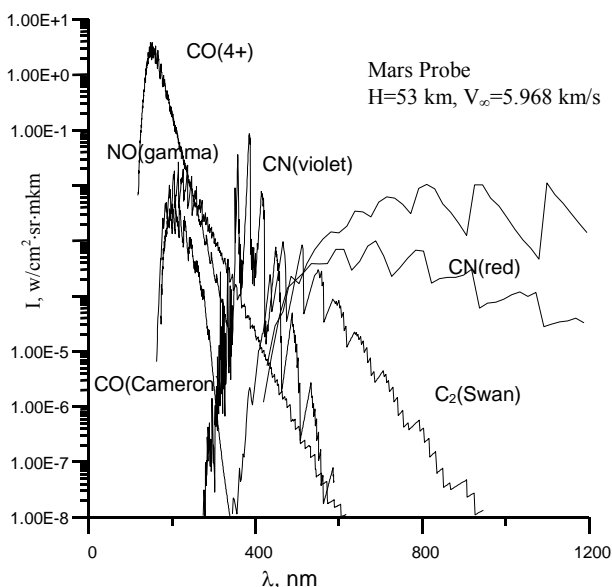


Рис.10. Спектр излучения в окрестности критической точки аппарата Mars Probe, $H=53$ км.

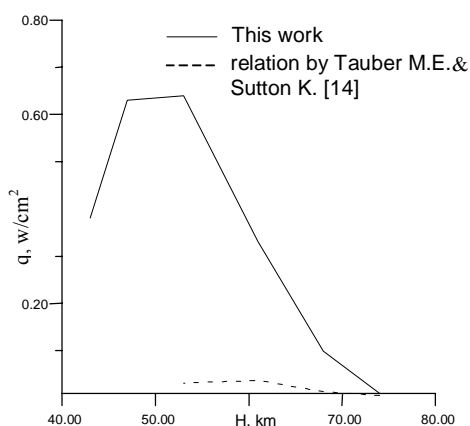


Рис.11. Радиационный тепловой поток в точке торможения по траектории полета аппарата Mars Probe.

Отметим, что интенсивность неравновесного лучистого потока для КА Mars Probe А с относительно малым радиусом затупления носовой части существенно превышает соответствующие значения интенсивности, полученные в равновесном подходе, но остаются много меньше конвективного теплового потока, расчетный максимум которого для условий полностью каталитической обтекаемой поверхности составляет $\sim 75 \text{ W/cm}^2$ (при $H = 45 \text{ км}$).

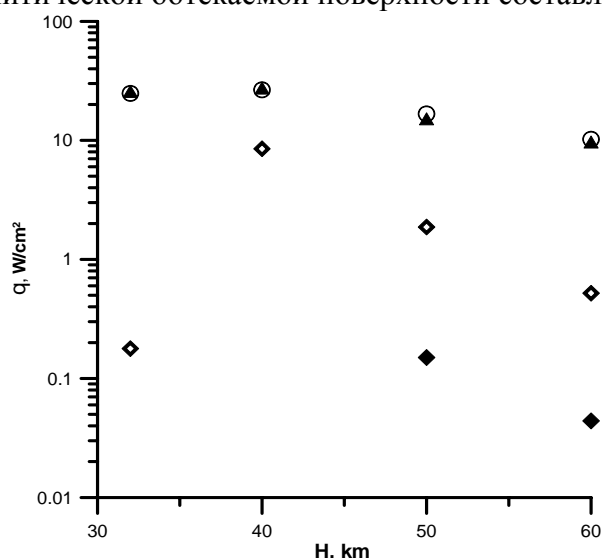


Рис.12 Расчетные неравновесные конвективный (○) и радиационный (◇) тепловые потоки к точке торможения аппарата сегментально-конической формы в зависимости от высоты полета. Равновесные данные: ◆ – радиационный поток (расчет по данным [14]), ▲ – конвективный поток (расчет по данным [15]).

На рис.12 показана зависимость конвективного и лучистого потока (в ультрафиолетовой и видимой части спектра) в критической точке КА сегментально-конической формы от высоты полета (конвективный тепловой поток вычислен для случая каталитической обтекаемой поверхности). Видно, что для КА с большим радиусом затупления носовой части отношение лучистого теплового потока к конвективному увеличивается.

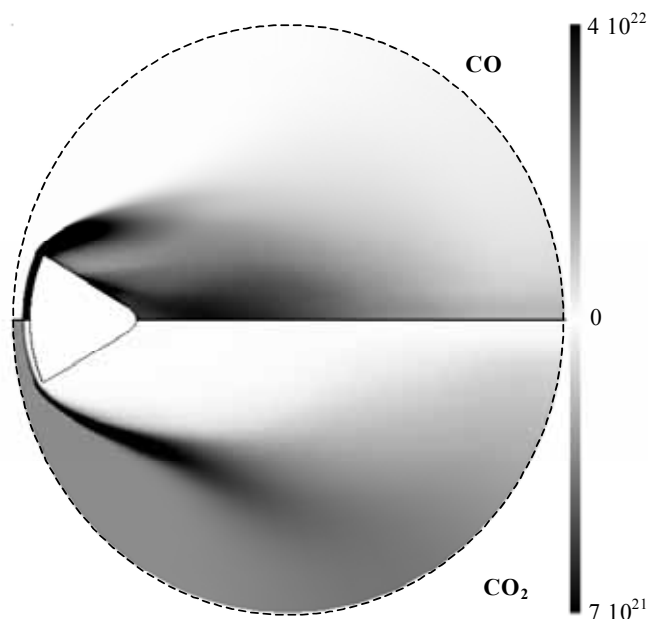


Рис.13. Распределение концентраций $n_{CO}(m^{-3})$ (верх) и $n_{CO_2}(m^{-3})$ (низ) в поле течения около аппарата сегментально- конической формы ($V_{\infty}=6$ км/с, $H= 60$ км). (Радиус расчетного поля равен 18 м).

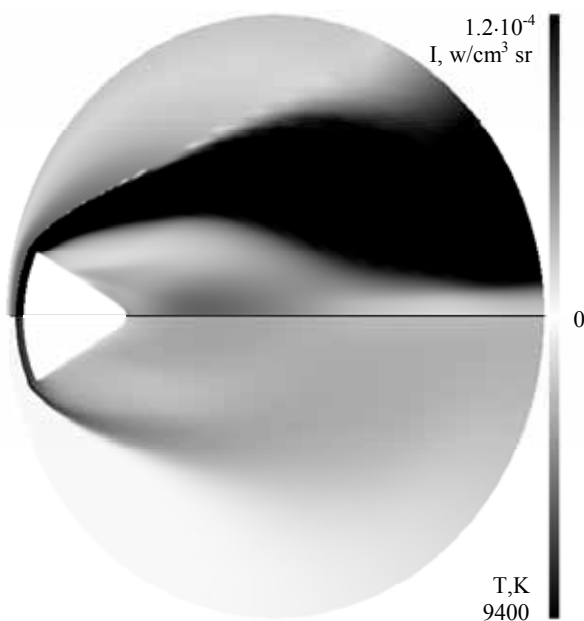


Рис.14. Распределение интенсивности неравновесного излучения около аппарата сегментально- конической формы ($V_{\infty}=6$ км/с, $H= 60$ км). (Радиус расчетного поля равен 18 м).

Однако, неравновесный лучистый поток все еще отличен от равновесного, определяемого по соотношению [14]. На рис.13 показано распределение в донной области сегментально-конического КА концентраций CO_2 и CO –основных излучательных компонентов в ИК области спектра, а на рис.14 пространственное распределение излучательной способности и температуры газа в донной области КА и температуры. Анализируя результаты расчетов, представленных на рис.13 и 14, можно сделать вывод о

том, что главным излучательным компонентом в донной области являются молекулы CO_2 , излучающие в высокотемпературных зонах на периферии ближнего следа за КА. На рис.15 представлено распределение лучистого теплового потока по образующей КА на высоте полета 60 км. Видно, что на этой высоте уровень лучистых потоков к поверхности КА достаточно низок.

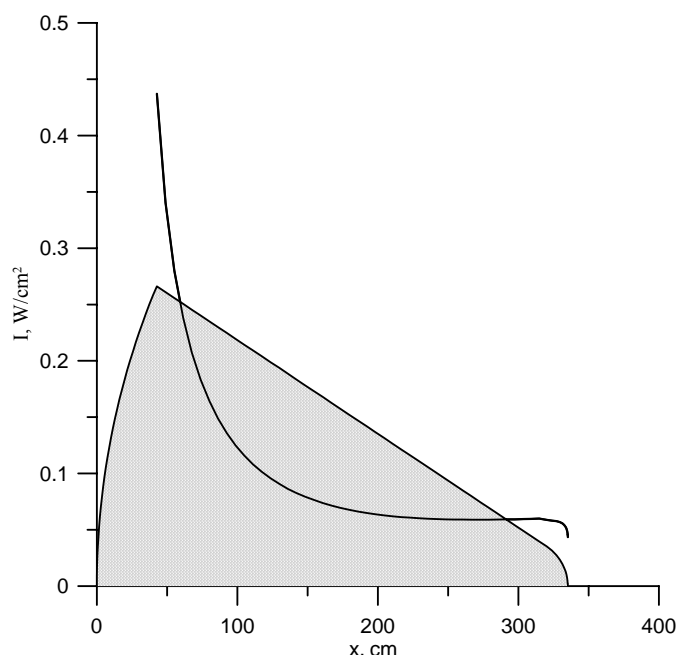


Рис.15. Распределение неравновесного радиационного теплового потока вдоль донной поверхности сегментально- конического аппарата ($V_\infty=6$ км/с, $H=60$ км).

Заключение

Разработанная численная модель физико-химических процессов в ударном слое около КА, входящего в атмосферу Марса, может быть использована для определения неравновесного лучистого потока к поверхности аппарата в диапазоне скоростей полета 4-8 км/с. При более низких скоростях существенный вклад в радиационный поток может вносить ИК излучение CO_2 , неравновесные характеристики которого за ударной волной требуют дополнительного изучения. Для КА с характерными размерами носовой части один метр и более оценочные данные по величинам максимальных лучистых потоков от ударного слоя могут быть получены на основе модели равновесного обтекания. При меньших размерах КА и при определении лучистых потоков в донной области (для любых размеров КА) требуется учет влияния неравновесных процессов.

Авторы благодарят С.Т.Суржикова за предоставление программы расчета ИК-излучения и Л.А.Кильдюшову- за помощь в обработке экспериментальных данных. Работа поддержана РФФИ (Грант 04-01-00551) и Грантом Президента РФ (МК-2373.2006.1).

Литература

1. Gorelov, V.A., Gladyshev, M.K., Kireev, A.Yu., Tchebureev, V.G., and Shilenkov, S.V., "Nonequilibrium Ionization and Radiation Behind Shock Wave in the Martian Atmosphere." *Proceedings of the 3-d European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 24-26 Nov. 1998, SP-426, pp.429 -437
2. Горелов, В.А., Гладышев, М.К., Киреев, А.Ю., Шиленков, С.В., "Неравновесная ионизация за сильной ударной волной в атмосфере Марса", ПМТФ, т.41, №6, 2000, с.970-975.
3. Кузнецова, Л.А., Кузьменко, Н.Е., Кузяков, Ю.Ю., Пластинин, Ю.А., Вероятности оптических переходов двухатомных молекул, М., Наука, 1980.

4. Losev, S.A., et al., "Radiation of a Mixture CO₂-N₂-Ar in Shock Waves: Experiment and Modelling" *Proceedings of the 3-d European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles*. ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 24-26 Nov. 1998, SP-426, pp.437-444.
5. Правилон, А.М., Фотопроцессы в молекулярных газах, М., Энергоатомиздат, 1992.
6. Povch, M.M., and Skubenich, V.V., "NO Electronic States Excitation by Electron Impact," *Proceedings of VIII International Conference on Phenomena in Electron - Atomic Collisions*, Beograd, Vol. 1, 1973, pp. 383-384.
7. Gross, R.W.F., and Cohen N., "Temperature Dependence of Chemiluminiscent Reactions II. Nitric Oxide Afterglow." *Journal of Chemical Physics*, Vol. 48, No. 6, 1968, pp. 2582-2590.
8. Drakes, J.A., McGregor, W.K., and Mason, A.A., "Two-Electron Exchange in Collisions of Neutral Molecules", *Journal of Chemical Physics*, v.99, N 10, 1993, pp.7813-7818
9. Gorelov, V.A., Kildushova, L.A., and Kireev, A.Y., "Ionization Particularities Behind Intensive Shock Waves in Air at Velocities of 8-15 km/s," AIAA Paper 94-2051, June 1994.
10. Gorelov, V.A., et.al. "Experimental and Numerical Study of Nonequilibrium Ultraviolet NO and N₂⁺ Emission in Shock-Layer", *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, v.12, N2, 1998, pp 172-180.
11. Thomas, G.M., and Menard, W.A., "Experimental Measurements of Nonequilibrium and Equilibrium Radiation from Planetary Atmospheres", *AIAA Journal*, v.4, N2, 1966, pp.227-237.
12. Yegorov, I.V., "The Numerical Simulation of Vibration- Dissociation Interaction at Hypersonic Overflow", AIAA Paper 96-1894, June 1996.
13. Kuznetsova, L.A. and Surzhikov, S.T., "Databases on Radiation Characteristics of Mars Atmospheric Partially Dissociated and Ionized Gas Species", ISTC Report N 036-A/7, 1997
14. Tauber, M.E., and Sutton, K., "Stagnation Point Radiative Heating Relations for Earth and Mars Entries." *Journal of Spacecraft and Rockets*, v.28, N1, 1991, pp.40-42.
15. Sutton K., Graves R.A. "General Stagnation Point Convective Heating Equation for Arbitrary Gas Mixture", NASA TR R376, Nov., 1971