

УДК 533.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РЕКОМБИНАЦИИ ТЗП ИЗ SiC ДЛЯ УСЛОВИЙ ПОЛЕТА АППАРАТА PRE-X В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2011 г.

В.И. Сахаров

НИИ механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

sakharov@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Проведенные расчеты тепловых потоков к цилиндрической модели с плоским торцом для условий экспериментов на установке ВГУ-4, моделирующих теплообмен в окрестности точки торможения на траектории спуска аппарата PRE-X в атмосфере Земли, позволили определить эффективную вероятность рекомбинации образца теплозащитного материала (ТЗП) из SiC. Применение при расчете карты тепловых потоков упрощенной газодинамической модели – уравнений пограничного слоя конечной толщины – существенно снизило вычислительные затраты, однако не повлияло на точность определения эффективной вероятности рекомбинации атомарных компонентов на ТЗП. Использование в расчетах, наряду с однотемпературной, многотемпературной модели газовой среды показало несущественное влияние колебательной релаксации на каталитические свойства ТЗП для условий, моделирующих теплообмен к аппарату. Проведенные расчеты предсказывают снижение температуры на 300–350 К к поверхности образца из SiC по сравнению с идеально-каталитической поверхностью для режимов, моделирующих теплообмен при движении аппарата вдоль траекторий в атмосфере Земли.

Ключевые слова: космический аппарат PRE-X, индукционный плазмотрон, численное моделирование, теплообмен с поверхностью, каталитические свойства.

В таблице 1 приведены значения скорости, теплового потока для идеально каталитической стенки в точке торможения в трех точках траектории спуска аппарата PRE-X в атмосфере Земли. Там же на основании теории моделирования теплообмена в точке торможения [1] при входе в атмосферу Земли аппарата PRE-X представлены параметры работы высокочастотного индукционного плазматрона ВГУ-4 и ряд измеренных в экспериментах параметров в дозвуковом режиме его работы.

ки торможения с рассчитанной. Совпадение этого параметра в расчете и в эксперименте позволит определить значение величины γ_w для данного ТЗП, которая входит в модель гетерогенного катализа первого порядка [2]. Расчеты проводились в рамках уравнений Навье–Стокса (Н–С) с использованием химически и термически неравновесных моделей газовых сред [2].

Экспериментальная модель имеет форму кругового цилиндра с торцевым затуплением и поперечным размером (диаметром) 140 мм, в

Таблица 1

Параметры для исследования каталитических свойств материала SiC в воздушном потоке

Точка траектории (режим)	V_∞ , м/с	Давление, ГПа	Тепловой поток, кВт/м ²	$N_{\text{ап}}$, кВт	К.п.д. ВГУ-4	Расстояние до модели, мм	Модель SiC, T_w , К	γ_w
1	7230	20	540	45	0.59	200	1496	$1 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$
2	6657	38	584	52	0.59	130	1543	$2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}$
3	5584	78	528	37.4	0.63	100	1576	0.0

Для определения эффективной вероятности гетерогенной рекомбинации атомов в диссоциированной смеси газов γ_w на теплозащитном покрытии модели, обтекаемой высокосубзвуковым потоком газа в индукционном плазматроне, необходимо провести сравнение измеренной в эксперименте температуры поверхности в области точ-

центральную часть которого помещен образец из SiC. Как показано в работе [3], тепловой поток к модели при $R_m/R_c > 1$ практически не зависит от диаметра модели $2R_m$, а определяется диаметром канала $2R_c$ (струи), что также нашло подтверждение в проведенных предварительных расчетах. Расход воздуха для всех режимов в расчетах и

экспериментах принимался $G = 2.4$ г/с. Остальные параметры работы плазматрона приведены в табл. 1.

Многочисленные расчеты, которые необходимо проводить в рамках уравнений Н–С для определения эффективной вероятности рекомбинации атомов γ_w на поверхности ТЗП, требуют многократно повторяющихся вычислений при вариации лишь одного параметра – коэффициента γ_w , и результаты будут меняться лишь в узком диффузионном слое около поверхности тела. Поэтому расчеты в области точки торможения были проведены с использованием упрощенной газодинамической модели течения – уравнений пограничного слоя (ПС) конечной толщины с учетом завихренности на внешней границе [3]. Граничные условия на внешней границе пограничного слоя заданной толщины, необходимые для решения этой задачи, могут быть взяты из единственного расчета, проведенного с использованием полных уравнений Н–С. В результате численных расчетов уравнений ПС при вариации двух параметров задачи γ_w и T_w может быть получена карта тепловых потоков $q_w(T_w, \gamma_w)$, пользуясь которой путем наложения на нее экспериментально измеренной на поверхности образца температуры T_w и рассчитанного для равновесно излучающей стенки теплового потока, определялась эффективная вероятность гетерогенной рекомбинации γ_w для испытываемого в данном эксперименте покрытия.

На рис. 1 приведена карта тепловых потоков, построенная для первого из трех рассчитанных режимов обтекания образца для термически равновесного случая. На рисунке обозначено: 1 – уравнения Н–С; 2 – эксперимент (плитка); 3 – эксперимент (SiC); 4 – уравнения ПС.

Измеренная в эксперименте в области точки торможения температура поверхности модели со вставкой из материала SiC и значения γ_w см. в табл. 1. На карте нанесены также результаты экспериментов для материала теплозащиты (плитка), применяемого в ВКС «Буран». Отметим, что для построения карт тепловых потоков данные на внешней границе ПС для всех значений температуры поверхности T_w и всех моделей газовой среды выбирались из решения уравнений Н–С для холодной медной поверхности. Тем не менее, определенные при решении системы уравнений Н–С тепловые потоки в области точки торможения модели при всех значениях T_w , как видно из рисунка, хорошо согласуются с «погранслоевыми» значениями.

Проведенные расчеты предсказывают снижение температуры на 300–350 К к поверхности образца из SiC по сравнению с идеально-каталитической поверхностью для режимов, моделирующих теплообмен при движении аппарата вдоль траектории в атмосфере Земли.

Работа выполнена совместно с А.Ф. Колесниковым и А.Н. Гордеевым (ИПМех РАН).

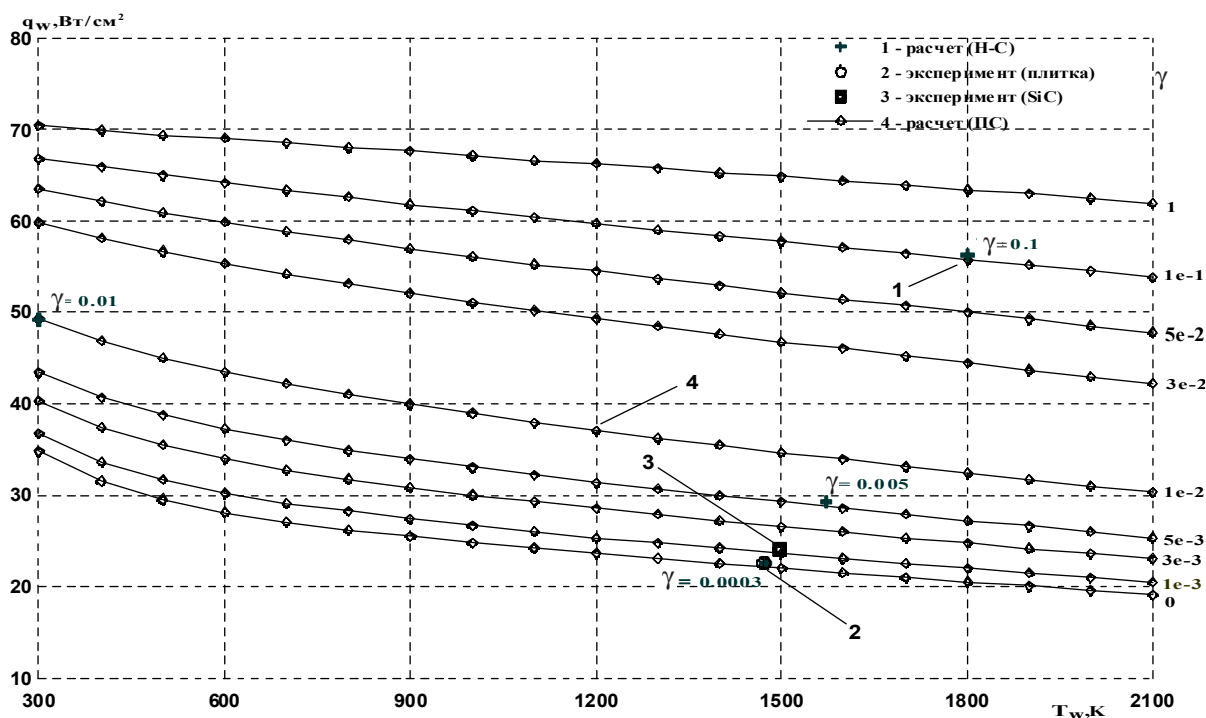


Рис. 1

Список литературы

1. Колесников А.Ф. // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1993. № 1. С. 172–180.
2. Сахаров В.И. // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2007. № 6. С. 157–168.
3. Колесников А.Ф., Якушин М.И. // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации: Сб. науч. трудов. М: Наука, 1987. С. 97–120.

**DETERMINATION OF THE SiC RECOMBINATION COATING COEFFICIENT
FOR THE PRE-X RE-ENTRY SPACE VEHICLE IN THE EARTH'S ATMOS**

V.I. Sakharov

Numerical simulation of subsonic ICP flow and exhausted air-plasma jets around the flat-face model with SiC coating were performed for IPG-4 (IPM RAS) facility test regimes simulating the re-entry heating of the Pre-X space vehicle (Earth). The calculation of the body heat flux maps was based on numerical solution of one-dimensional equations of laminar thermally and chemically non-equilibrium multi components boundary layer with finite thickness. The calculated values of the stagnation point heat fluxes for SiC samples do not depend on thermal non-equilibrium. The duplication predicts the reduction of the wall temperature of the SiC sample by 300–350 K with respects to fully a catalytic wall at the peak heating part of the trajectories.

Keywords: re-entry Pre-X space vehicle, inductive plasmatron, numerical simulation, heat transfer, catalytic properties.