

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ НЕРАВНОВЕСНОГО МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЕ

С. В. Пейгин, В. Ю. Казаков

НИИ ПММ Томского университета, 634050 Томск

Представлен метод определения зависимости вероятности гетерогенной рекомбинации  $\gamma_w$  по результатам измерений теплового потока  $Q_w$  к поверхности каталитического датчика при его импульсном обдуве сверхзвуковым потоком газа, диссоциированного падающей ударной волной, распространяющейся в ударной трубе. Показано, что точность определения  $\gamma_w$  зависит не только от точности измерений в эксперименте, но и от результатов математического моделирования течения диссоциированного газа около поверхности тела. Представлены результаты обработки эксперимента.

**Введение.** Каталитические свойства материалов по отношению к гетерогенной рекомбинации в сверхзвуковых потоках диссоциированных газов значительно влияют на уровень тепловых нагрузок к телу [1]. В связи с созданием космических аппаратов много-разового использования «Shuttle» и «Буран» в 80-х годах начались интенсивные экспериментальные и теоретические исследования по выяснению фундаментальных закономерностей процессов, протекающих на поверхности в гетерогенных каталитических реакциях, и определению количественных характеристик этих реакций для различных материалов [2–6]. Зависимость вероятности гетерогенной рекомбинации  $\gamma_w$  от состояния газа, взаимодействующего с поверхностью, в настоящее время не выяснена. Из известных экспериментальных методик наиболее приближено к условиям, возникающим при входе тел в плотные слои атмосферы, использование для определения  $\gamma_w$  импульсного обдува модели сверхзвуковым потоком газа, диссоциированного падающей ударной волной, распространяющейся в ударной трубе [7]. В этих экспериментах измеряется только тепловой поток  $Q_w$  к поверхности исследуемого материала, зависящий от каталитических гетерогенных реакций и от процессов, протекающих в слое газа около поверхности. Поэтому точность определения  $\gamma_w$  зависит не только от точности измерения теплового потока  $Q_w$ , но и от результатов математического моделирования течения диссоциированного газа около поверхности тела.

В настоящей работе приведены результаты определения вероятности гетерогенной рекомбинации атомов кислорода по экспериментальным данным [8, 9]. В качестве математической модели используется теория ламинарного пограничного слоя с учетом неравновесного характера протекания химических реакций и многокомпонентной диффузии [1]. Исходные уравнения решаются на основе высокоэффективного численного алгоритма высокого порядка точности [10], не требующего при реализации предварительного разрешения соотношений Стефана — Максвелла относительно диффузионных потоков. Расчеты проводились для различных вариантов условий в набегающем потоке с оценкой точности и эффективности алгоритма. Приближенные решения этой задачи с упрощающими предположениями о характере течения газа в пограничном слое сделаны в [11, 12].

**Постановка задачи.** Рассматривается гиперзвуковое неравновесное течение смеси

газов  $O_2$ ,  $O$ ,  $Ag$  около плоской пластины, состоящей из двух частей ( $M_1$  и  $M_2$ ), которые покрыты веществами с различными каталитическими свойствами. Поверхность  $M_1$  некаталитическая при  $x < L$ , поверхность  $M_2$  покрыта материалом, каталитические свойства которого исследуются.

Исходной математической моделью служила теория ламинарного пограничного слоя (ЛПС), уравнения которой представляют собой предельную форму уравнений Навье — Стокса при  $Re \rightarrow \infty$ . Эта модель асимптотически точно описывает структуру течения вблизи поверхности тел при больших числах Рейнольдса и имеет хорошую точность уже при  $Re_\infty > 10^{3,5}$ . Поскольку в эксперименте для условий в набегающем потоке  $Re_\infty \sim 10^4$ , то теория ЛПС может быть использована для решения поставленной задачи.

Исходная система уравнений, записанная в системе координат  $(x, y)$ , с учетом неравновесных химических реакций, многокомпонентного характера диффузии и без учета бародиффузии, термодиффузии и диффузионного термоэффекта имеет размерный вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right); \quad (2)$$

$$\rho c_p \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu c_p}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 - \frac{\partial T}{\partial y} \sum_{k=1}^N c_{pk} I_k - \sum_{k=1}^N h_k \dot{W}_k; \quad (3)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial c_k}{\partial x} + v \frac{\partial c_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial I_k}{\partial y} = \dot{W}_k, \quad k = 1, 2, \dots, N-1; \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$P = \rho R_A T \sum_{k=1}^N \frac{c_k}{m_k}; \quad (6)$$

$$\mu \frac{\partial x_i}{\partial y} = \sum_{j=1}^N \frac{m^2}{m_j m_i} S_{ij} (c_i I_j - c_j I_i), \quad i = 1, 2, \dots, N-1; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N I_j = \hat{u}, \quad \sum_{j=1}^N c_j = 1, \quad x_i = c_i \frac{m}{m_i}. \quad (8)$$

Здесь координата  $y$  направлена по нормали к поверхности,  $x$  — вдоль поверхности пластины;  $u$  и  $v$  — физические компоненты вектора скорости вдоль  $x$  и  $y$  соответственно;  $P$ ,  $\rho$ ,  $T$  — давление, плотность и температура газовой смеси;  $\mu$ ,  $c_p$ ,  $Pr = \mu c_p / \lambda$ ,  $m$  — вязкость, удельная теплоемкость, число Прандтля и молекулярная масса газовой смеси;  $c_i$ ,  $m_i$ ,  $h_i$ ,  $c_{pi}$ ,  $I_i$ ,  $\dot{W}_i$  — массовая концентрация, молекулярная масса, удельная энтальпия, удельная теплоемкость, нормальная компонента вектора диффузионного потока и скорость образования  $i$ -го компонента;  $S_{ij}$  — бинарное число Шмидта.

Система (1)–(8) решается с граничными условиями:

— на внешней границе пограничного слоя

$$y \rightarrow \infty: \quad u = u_e(x), \quad T = T_e(x), \quad C_i = C_{ie}(x);$$

— на поверхности пластины

$$y = 0: \quad u = v = 0, \quad T_w = 300 \text{ K}, \quad x < L: \quad I_O = I_{O_2} = I_{Ag} = 0,$$

$$x \geq L: I_O = -\gamma_w \sqrt{\frac{RT_w}{2\pi m_O}} \rho_w C_{O_2}, \quad I_{O_2} = -I_O, \quad I_{Ar} = 0.$$

В потоке идут реакции диссоциации-рекомбинации кислорода:

- 1)  $O_2 + O_2 = 2O + O_2$ ,
- 2)  $O_2 + O = 3O$ ,
- 3)  $O_2 + Ar = 2O + Ar$ .

Коэффициенты прямых  $D_j$  [ $\text{см}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$ ] и обратных  $R_j$  [ $\text{см}^6/(\text{моль}^2 \cdot \text{с})$ ] реакций имеют вид

$$D_j = AT^a \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad R_j = BT^b.$$

Значения  $A$ ,  $a$ ,  $E_a/R$ ,  $B$ ,  $b$  для реакций 1–3 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Реакция	$A$	$a$	$E_a/R$	$B$	$b$
1	$2,3 \cdot 10^{19}$	-1,0	59 400	$1,9 \cdot 10^{16}$	-0,5
2	$8,5 \cdot 10^{19}$	-1,0	59 400	$7,1 \cdot 10^{16}$	-0,5
3	$3,0 \cdot 10^{18}$	-1,0	59 400	$2,5 \cdot 10^{15}$	-0,5

Для вычисления коэффициентов переноса смеси и термодинамических величин используются формулы [13–15]

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\mu_i c_i / m_i}{c_i / m_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} c_j / m_j}}{\sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i c_i / m_i}{c_i / m_i + 1,065 \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} c_j / m_j}}, \quad \lambda = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i c_i / m_i}{c_i / m_i + 1,065 \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} c_j / m_j}}{\sum_{i=1}^N \frac{\lambda_i c_i / m_i}{c_i / m_i + 1,065 \sum_{j=1, j \neq i}^N G_{ij} c_j / m_j}},$$

$$\mu_i = 2,6693 \cdot 10^{-5} \sqrt{m_i T} / (\sigma_i^2 \Omega_i^{(2,2)*}), \quad \lambda_i = \frac{15}{4} \mu_i \frac{R_A}{m_i} (O, Ar),$$

$$\lambda_i = \frac{15}{4} \mu_i \frac{R_A}{m_i} \left(0,115 + \frac{0,354 c_{pi}}{R_A}\right) (O_2), \quad D_{ij} = 0,00268 T^{3/2} \sqrt{\frac{m_j + m_i}{2m_i m_j}} \left(P \sigma_{ij}^2 \Omega_{ij}^{(1,1)*}\right)^{-1},$$

$$G_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \sqrt{\frac{m_j}{m_i + m_j}} \left[1 + \left(\frac{m_j}{m_i}\right)^{0,25} \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{0,5}\right]^2,$$

$$\Omega_{ij}^{(1,1)*} = 1,074 \left(\frac{T k}{\sqrt{\varepsilon_i \varepsilon_j}}\right)^{-0,1604}, \quad \Omega_i^{(2,2)*} = 1,157 \left(\frac{T k}{\varepsilon_i}\right)^{-0,1472}, \quad \sigma_{ij} = 0,5(\sigma_i + \sigma_j),$$

где  $i$  — номер компоненты. Величины  $\varepsilon_i/k$  и  $\sigma_i$  приведены ниже:

$$\varepsilon_1/k = 106,7, \quad \sigma_1 = 3,467; \quad \varepsilon_2/k = 106,7, \quad \sigma_2 = 3,050; \quad \varepsilon_3/k = 93,3, \quad \sigma_3 = 3,542.$$

Были рассмотрены 11 вариантов соотношений между скоростью, давлением, температурой и молярными концентрациями отдельных компонентов на внешней границе пограничного слоя для трех исследуемых материалов: платины, алюминия и монооксида кремния. Условия эксперимента и значение теплового потока  $Q_w$  в точке  $x = L = 18$  мм, определенного в ходе эксперимента, представлены в табл. 2.

В данной работе проведен расчет вероятности гетерогенной рекомбинации  $\gamma_w$  для различных материалов на основе экспериментальных данных по тепловым потокам к поверхности тела в точке  $x = L$ .

Таблица 2

Варианты	Материал покрытия $M_2$	$V_\infty$ , м/с	$T_\infty$ , К	$P_\infty$ , мм рт. ст.	$x_{O_\infty}$	$x_{O_2\infty}$	$x_{Ar\infty}$	$Q_w$ , кал/(см <sup>2</sup> ·с)
1	Платина	2760	3180	79,0	0,03	0,29	0,68	40,0
2	»	2740	3180	90,0	0,03	0,29	0,68	50,2
3	»	2830	3300	87,0	0,02	0,30	0,68	42,0
4	»	2590	3020	78,0	0,05	0,25	0,70	37,1
5	Алюминий	2800	3240	84,0	0,02	0,30	0,68	33,0
6	Моноксид кремния	2790	3240	89,0	0,02	0,30	0,68	34,3
7	»	2820	3280	85,0	0,02	0,30	0,68	35,6
8	»	2820	3290	96,0	0,02	0,30	0,68	37,1
9	»	2800	3240	84,0	0,02	0,30	0,68	35,0
10	»	2830	3310	92,0	0,02	0,30	0,68	36,8
11	»	2760	3180	82,0	0,02	0,30	0,68	31,5

**Метод численного решения.** Исходная система уравнений записывалась в переменных Дородницина, и таким образом разрешались проблемы особенностей в точке  $x = 0$ :

$$\xi = \int_0^x \rho_e \mu_e u_e dx, \quad \eta = \frac{u_e}{\sqrt{2\xi}} \int_0^y \rho dy, \quad f'_\eta = \frac{u}{u_e}, \quad \theta = \frac{T}{T_e}$$

$$X_i = \frac{\sqrt{2\xi}}{c_l} I_i, \quad l = \frac{\mu\rho}{\mu_e\rho_e}, \quad X_q = -\frac{lT_e c_p}{Pr} \theta'_\eta + \sum_{k=1}^N h_k X_k.$$

Соотношения Стефана — Максвелла использовались в виде

$$X_i = \alpha_i c'_{i\eta} + \beta_i c_i, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (9)$$

где

$$\alpha_i = -\frac{lb_{(ii)}}{S_{iN} a_{(ii)}}, \quad \beta_i = a_{ii}^{-1} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-1} \left( a_{ij}^* X_j + c'_{j\eta} \frac{lb_{ij}^*}{S_{iN}} \right), \quad a_{ij} = -a_{ij}^* c_i, \quad b_{ij} = -b_{ij}^* c_i \quad (i \neq j),$$

$$a_{ij}^* = \frac{m_N S_{ij}}{m_j S_{iN}} - \frac{S_{iN}}{S_{iN}}, \quad b_{ij}^* = \frac{m_N}{m_j} - 1, \quad a_{ii} = \frac{S_{iN}}{S_{iN}} + \sum_{j=1, j \neq i}^{N-1} a_{ij}^* c_j, \quad b_{ii} = 1 + \sum_{j=1, j \neq i}^{N-1} b_{ij}^* c_j.$$

Решение задачи получено на основе неявной по  $\eta$  конечно-разностной схемы, имеющей порядок аппроксимации  $O(\Delta\eta)^4$  [10]. Каждое из исходных уравнений приводилось к системе уравнений первого порядка, а затем они решались в такой последовательности: уравнение движения, энергии и уравнения для концентраций  $O_2$  и  $O$ .

Уравнения для концентраций решались на основе подхода [16], включающего следующие алгоритмические шаги:

а) уравнения для концентраций рассматривались как задача Коши (с граничными условиями на поверхности тела) для уравнений первого порядка относительно диффузионных потоков  $X_i$ , значения концентраций и их производных брались с предыдущей итерации;

б) после определения  $X_i$  вычислялись коэффициенты  $\alpha_j$  и  $\beta_j$ ;

в) с известными значениями коэффициентов  $\alpha_j$  и  $\beta_j$  соотношения Стефана — Максвелла (9) подставлялись в уравнения для концентраций, затем решалась краевая задача для

Таблица 3

$\eta$	$U/U_e$	$T$	$C_O$	$U/U_e$	$T$	$C_O$
	$N = 12$			$N = 120$		
0	0	300,0	0,14027	0	300,0	0,1405
0,2	—	—	—	0,0498	611,6	0,1405
0,4	—	—	—	0,1105	962,3	0,406
0,5	0,14403	1143,7	0,14051	0,1441	1144,8	0,1407
0,6	—	—	—	0,1796	1328,5	0,1407
0,8	—	—	—	0,2554	1689,7	0,1408
1,0	0,3356	2027,3	0,1409	0,3357	2028,4	0,1410
2,0	0,7275	3055,5	0,1414	0,7277	3055,7	0,1415
3,0	0,9436	3201,7	0,1417	0,9436	3201,6	0,1417
4,0	0,9949	3187,3	0,1417	0,9949	3187,3	0,1417
5,0	0,9998	3181,8	0,1417	0,9998	3181,8	0,1417
6,0	1,0000	3180,4	0,1417	1,0000	3180,4	0,1417

уравнений второго порядка относительно  $c_i$ , после чего итерационный процесс повторялся начиная с шага  $a$ .

При данной вычислительной процедуре не требуется разрешения соотношений Стефана — Максвелла для диффузионных потоков.

В задаче использовалась следующая линейаризация:

— в уравнении энергии линейаризация скорости образования  $k$ -й компоненты

$$\left(\frac{\dot{W}_k}{\rho}\right)^i = \left(\frac{\dot{W}_k}{\rho}\right)^{i-1} + \left(\frac{\partial \dot{W}_k \rho^{-1}}{\partial \theta}\right)^{i-1} (\theta^i - \theta^{i-1}),$$

где  $i$  — номер текущей итерации;

— в уравнениях для концентраций [17]  $(\dot{W}_k/\rho)^i = W_{0k}^{i-1} - W_{1k}^{i-1} c_k^i$ .

**Результаты расчетов.** Анализ численных результатов показывает, что предложенный алгоритм устойчив и экономичен. Влияние величины шага сетки на точность расчетов в точке  $x = 10$  мм для первого варианта условий в набегающем потоке представлено в табл. 3, 4.

Для определения вероятности гетерогенной рекомбинации  $\gamma_w$  использовался следующий итерационный процесс. На первом шаге после точки разрыва каталитических свойств для данного  $\gamma_w$  вычислялся тепловой поток  $Q_w$ , полученное значение сравнивалось с экспериментальными данными по тепловому потоку, значение  $\gamma_w$  уточнялось, и расчет уравнений пограничного слоя повторялся. Для сходимости требовалось 6–7 таких итераций.

Таблица 4

$\eta$	$U/U_e$	$T$	$C_O$	$U/U_e$	$T$	$C_O$
	$N = 3$			$N = 6$		
0	0	300,0	0,1380	0	300,0	0,1396
2,0	0,71754	3031,2	0,1411	0,7266	3053,9	0,1413
3,0	—	—	—	0,9434	3202,3	0,1417
4,0	0,99713	3179,4	0,1417	0,9949	3187,0	0,1417
5,0	—	—	—	0,9998	3181,8	0,1417
6,0	1,00000	3180,4	0,1417	1,0000	3180,4	0,1417

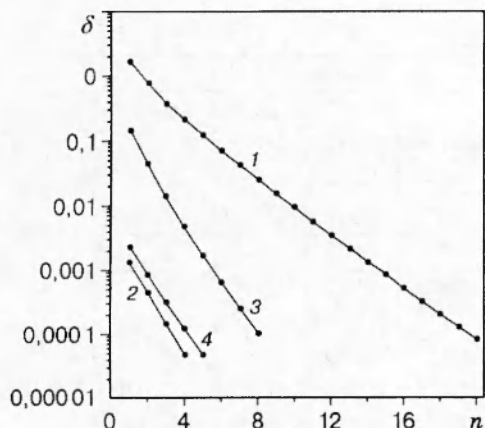


Рис. 1. Зависимость параметра сходимости  $\delta$  от числа итераций  $n$  при маршевой координате  $x = 0; 18; 18,01; 30$  мм (кривые 1-4)

Кроме того, для получения решения задачи на текущем луче ( $x = \text{const}$ ) использовались локальные итерации по нелинейности. Итерационный процесс считался сходящимся, если параметр  $\delta$  (максимальное отличие всех искомых функций во всех точках разностной сетки на двух соседних итерациях) не превышал  $10^{-4}$ . Расчеты показали, что вышеописанный численный метод очень экономичен и имеет высокую скорость сходимости по нелинейности. Пример зависимости параметра  $\delta$  от числа итераций  $n$ , характеризующий скорость сходимости итерационного процесса по нелинейности, для 9-го варианта условий на внешней границе пограничного слоя и различных значений маршевой координаты  $x$  представлен на рис. 1. Видно, что, за исключением первой расчетной точки, для получения решения с точностью  $10^{-4}$  необходимы 4-6 итераций.

Характерные примеры расчета профиля скорости поперек пограничного слоя и распределение теплового потока вдоль поверхности пластины, полученные на основе численного решения задачи для 9-го варианта условий на внешней границе, представлены на рис. 2, 3. Видно, что решение уравнений пограничного слоя (включая и распределение параметров поперек пограничного слоя) достаточно сильно зависит от маршевой коорди-

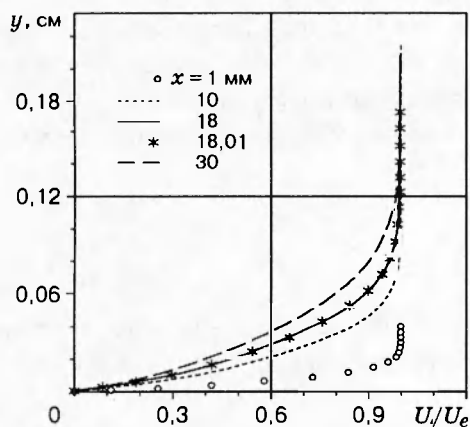


Рис. 2

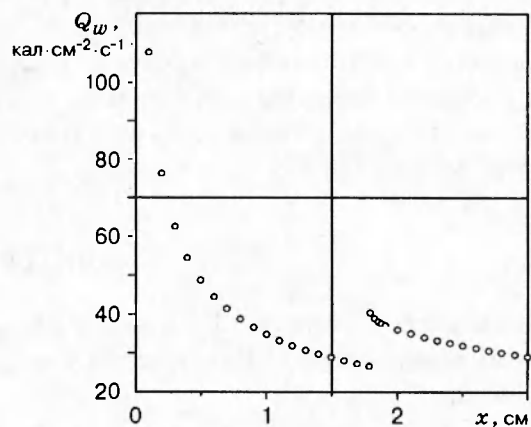


Рис. 3

Рис. 2. Профили скорости вдоль поверхности пластины (расчет для 9-го варианта условий)

Рис. 3. Распределение теплового потока вдоль поверхности пластины (расчет для 9-го варианта условий)

Таблица 5

Варианты	Материал покрытия $M_2$	$\gamma_w$	$\gamma_w (\dot{w}_k = 0)$	$\gamma_w$ [11]
1	Платина	$1,2572 \cdot 10^{-2}$	$1,3604 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
2	»	$1,8442 \cdot 10^{-2}$	$1,9723 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$
3	»	$1,0162 \cdot 10^{-2}$	$1,1347 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
4	»	$1,5298 \cdot 10^{-2}$	$1,6156 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
5	Алюминий	$3,8468 \cdot 10^{-3}$	$4,9752 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
6	Моноксид кремния	$4,0001 \cdot 10^{-3}$	$5,2323 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
7	»	$5,4632 \cdot 10^{-3}$	$6,5990 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
8	»	$4,3169 \cdot 10^{-3}$	$5,6620 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
9	»	$5,5321 \cdot 10^{-3}$	$6,6644 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$
10	»	$4,7177 \cdot 10^{-3}$	$5,9781 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
11	»	$3,6286 \cdot 10^{-3}$	$4,7475 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$

наты, в силу чего следует ожидать, что использование широко распространенного приближения локальной автомодельности может привести к значительной погрешности.

Значения вероятности гетерогенной рекомбинации  $\gamma_w$ , вычисленные на основе экспериментальных данных для теплового потока к поверхности в точке  $x = 18$  мм, приведены в табл. 5. Данные в 3-й графе получены на основе решения задачи в полной постановке, а в 4-й — с учетом предположения о замороженном характере протекания гомогенных химических реакций внутри пограничного слоя. Результаты [11] получены в предположении локальной автомодельности течения и отсутствия химических реакций в газовой фазе. Видно, что точность используемой математической модели течения может достаточно сильно сказываться на значении вероятности гетерогенной рекомбинации (изменения могут достигать 70–100 %).

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что предложенный в настоящей работе подход и реализованный на его основе численный алгоритм в рамках асимптотически правильной гидродинамической модели течения с учетом сложного характера протекающих в потоке неравновесных физико-химических процессов позволяют определить вероятность гетерогенной рекомбинации атомов кислорода по результатам экспериментального измерения теплового потока к поверхности, покрытой исследуемыми материалами. Описанный численный метод может быть рекомендован для обработки экспериментальных данных для других материалов покрытий и смесей газов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-01-00832).

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Пейгин С. В., Тирский Г. А.** Трехмерные задачи сверх- и гиперзвукового обтекания тел потоком вязкого газа // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ. 1988. Т. 22. С. 62–177.
2. **East R. A., Stalker R. A., Baird J. P.** Measurements of heat transfer to a flat plate in a dissociated high-enthalpy laminar air flow // J. Fluid Mech. 1980. V. 97, N 4. P. 673–699.
3. **Scott C. D.** Catalytic recombination of nitrogen and oxygen on high temperature reusable surface insulation. N. Y., 1980 (Paper / AIAA, N 80-1477).
4. **Rakich J. V., Steward D. A., Lanfranco M. J.** Results of flight experiment on the catalytic efficiency of Space Shuttle heat shield. N. Y., 1982 (Paper / AIAA, N 82-944).

5. Gupta R. N., Moss J. N., Simmonds A. L., Zoby E. V. Space Shuttle heating analysis with variation of attack and catalycity // J. Spacecraft and Rocket. 1984. V. 21, N 2. P. 217-219.
6. Ковалев В. Л., Суслов О. Н. Модель взаимодействия частично ионизованного воздуха с каталитической поверхностью // Исследования по гиперзвуковой аэродинамике и теплообмену с учетом неравновесных химических реакций. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 58-69.
7. Nasser E. A. M., East R. A. A shock tube investigation of heat transfer from dissociated hydrogen to catalytic surfaces // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1980. V. 24, N 4. P. 515-526.
8. Беркут В. Д., Ковтун В. В., Кудрявцев Н. Н., Новиков С. С. Метод определения вероятности гетерогенной рекомбинации атомов при взаимодействии сверхзвуковых потоков с поверхностями // Хим. физика. 1985. Т. 4, № 5. С. 673-683.
9. Беркут В. Д., Ковтун В. В., Кудрявцев Н. Н. и др. Определение мгновенных значений вероятности гетерогенной рекомбинации атомов при импульсном обдуве сверхзвуковым потоком в ударной трубе // Хим. физика. 1985. Т. 4, № 9. С. 1264-1271.
10. Петухов И. В. Численный расчет двумерных течений в пограничном слое // Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы. М.: Наука, 1964. С. 305-325.
11. Беркут В. Д., Ковтун В. В., Кудрявцев Н. Н. и др. Вероятности гетерогенной рекомбинации атомов кислорода на поверхности окиси алюминия, платины и монооксида кремния, измеренные при импульсном обдуве сверхзвуковым потоком в ударной трубе // Хим. физика. 1985. Т. 4, № 10. С. 1358-1365.
12. Гершбейн Э. А., Казаков В. Ю. Об определении констант скоростей гетерогенных каталитических реакций в экспериментально-теоретических исследованиях течения газа около плоской поверхности // Теплофизика высоких температур. 1988. Т. 26, № 1. С. 106-114.
13. Wilke C. R. A viscosity equation gas mixtures // J. Chem. Phys. 1959. V. 18, N 4. P. 517-519.
14. Mason E. A., Saxena S. C. Approximate formula for the thermal conductivity // Phys. Fluids. 1958. V. 1, N 5.
15. Гурвич Л. В., Вейц И. А., Медведев В. А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. М.: Наука, 1978. Кн. 2. Т. 1.
16. Гершбейн Э. А. Ламинарный многокомпонентный пограничный слой при больших вдувах // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1970. № 1. С. 64-73.
17. Blottner F. G. Viscous shock layer at the stagnation point with nonequilibrium air chemistry // AIAA J. 1969. N 12. P. 2281-2288.

*Поступила в редакцию 10/X 1996 г.,  
в окончательном варианте — 21/I 1997 г.*

---