

УДК 533.6.011.5:532.526

ЭФФЕКТ ДИФфуЗИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

КОВАЛЕВ В. Л., СУСЛОВ О. Н.

С помощью асимптотического разложения решения при больших числах Шмидта системы уравнений химически неравновесного многокомпонентного пограничного слоя у каталитической поверхности затупленного тела [1] получены формулы для диффузионных потоков продуктов реакций, химических элементов и потока тепла в зависимости от перепадов концентраций продуктов реакций, концентраций химических элементов и энтальпии поперек пограничного слоя. Показано, что при сверхзвуковом обтекании тела воздухом величина диффузионного разделения химического элемента кислорода существенно зависит от концентрации атомов на внешней границе пограничного слоя и характера протекания гомогенных и гетерогенных каталитических реакций. Если поверхность способствует быстрой рекомбинации атомов кислорода и химически нейтральна к атомам азота, то на теле образуется избыток химического элемента кислорода. В противном случае имеем повышенную концентрацию химического элемента азота. Диффузионное разделение элементов на поверхности, обладающей свойством избирательности каталитического воздействия, в отличие от случая идеально каталитической стенки [2-4] имеет место даже тогда, когда на внешней границе пограничного слоя присутствуют одни атомы. На химически нейтральной поверхности диффузионное разделение элементов может вызываться гомогенными химическими реакциями рекомбинации атомов кислорода и азота, если их константы скоростей существенно различаются.

В [2-4] эффект диффузионного разделения элементов изучен для случая идеально каталитической поверхности и показано, что максимальная концентрация химического элемента кислорода достигается при условиях, когда на внешней границе пограничного слоя молекулы кислорода почти полностью продиссоциировали, а азот еще не начал диссоциировать, так как атомы кислорода диффундируют к телу быстрее молекул азота.

1. Рассмотрим обтекание затупленного тела сверхзвуковым потоком газа, когда за отошедшей волной около его каталитической поверхности образуется многокомпонентный диссоциированный, а при достаточно больших скоростях обтекания — частично ионизованный химически неравновесный пограничный слой. В работах [1, 5] система уравнений движения, диффузии и притока тепла и замыкающие ее соотношения Стефана — Максвелла представлены в нормальной форме Коши, удобной для асимптотического и численного решения. Приведем соответствующую краевую задачу для окрестности передней критической точки затупленного тела в переменных Дородницына в форме Лиза (без проекции уравнения импульсов на координату x , касательную к телу)

$$\frac{dX}{d\eta} = -\frac{Sc}{l} f\pi X + W, \quad \frac{dZ}{d\eta} = -\frac{Sc}{l} \pi X$$

$$X=R^s, \quad \eta=0, \quad Z=Z_e, \quad \eta \rightarrow \infty \quad (1.1)$$

$$Z = (c_1 \dots c_R, c_{R+1}^* \dots c_{n-2}^* h)^T, \quad X = \beta^\circ (J_1 \dots J_R, J_{R+1}^* \dots J_{n-2}^* J_q)^T$$

$$W = \beta_1 (w_1 \dots w_R, 0 \dots 0)^T, \quad R^s = \beta^\circ (r_1 \dots r_R, 0 \dots 0, r_q)^T, \quad R = n - n_e$$

$$l = \frac{\mu \rho}{\mu_w \rho_w}, \quad Sc = \frac{\mu}{\rho D_{ij}}, \quad \eta = \beta^\circ \mu_w \rho_w \int_0^\eta \rho dy, \quad \beta = \left(\frac{du_e}{dx} \right)_{x=0}, \quad \beta_1^{-1} = \beta \rho (\nu + 1)$$

$$\beta^0 = (\beta(\nu+1)\mu_w\rho_w)^{-1/2}, \quad u = \beta x f'_1, \quad f = -\beta^0 \rho v, \quad r_q = (k\partial T/\partial y)_s - \varepsilon \sigma^* T^4$$

Здесь c_i, c_i^*, h, ρ, T — массовые концентрации i -го продукта реакции и химического элемента, энтальпия и плотность смеси, температура; J_i, J_i^*, J_q — проекции на нормаль к поверхности массовых диффузионных потоков i -го продукта реакции и химического элемента, потока тепла; n, n_e — число компонент и химических элементов; w_i, r_i — массовые скорости образования i -го продукта в гомогенных и гетерогенных реакциях; $(k\partial T/\partial y)_s$ — поток тепла в твердое тело; ε, σ^* — степень черноты и постоянная Больцмана, $\nu=0$ для плоского случая и $\nu=1$ для осесимметричных тел; μ, Sc — вязкость смеси и характерное число Шмидта, построенное по некоторому бинарному коэффициенту диффузии D_{ij} , взятому из числа бинарных коэффициентов, описывающих данную многокомпонентную смесь; x, y, u, v — координаты вдоль поверхности тела и по нормали к ней, проекции среднemasовой скорости на касательную и нормаль к поверхности тела; индекс w относится к условиям на поверхности тела, e — к условиям на внешней границе пограничного слоя, T обозначает операцию транспонирования. Компоненты матрицы $\pi(Z)$ размерности $(n-1) \times (n-1)$ выражаются через бинарные коэффициенты диффузии, коэффициенты термомодиффузии, молекулярные веса всех компонент и являются известными функциями состава, температуры и давления [5]. К системе (1.1) необходимо добавить связь между энтальпией и температурой и уравнение состояния

$$h = \sum_{k=R+1}^n c_k^* h_k - \sum_{k=1}^R c_k Q_k, \quad h_k = \int_0^T c_{pk} dT, \quad p = \rho R_A T \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{m_i} \quad (1.2)$$

где p, Q_k, c_{pk}, m_k, R_A — давление, массовая теплота образования продукта реакции с номером k из компонент, принятых за базисные, теплоемкость и молекулярный вес k -й компоненты, универсальная газовая постоянная.

Массовые скорости образования компонент во всех простых гомогенных реакциях выразим через величины v_r , представляющие собой отклонения от равновесия только независимых химических реакций [5]

$$w = \beta_1^{-1} W_g \varepsilon_g^{-1} v, \quad v_r = p^{v_r' - v_r''} K_{pr} \prod_{j=1}^n x_j^{v_{rj}'} - \prod_{j=1}^n x_j^{v_{rj}''}, \quad r \leq R$$

$$\varepsilon_g = \text{diag}(\varepsilon_{g1} \dots \varepsilon_{gR} 1 \dots 1), \quad \varepsilon_{gr}^{-1} = K_r^{-1} (\rho/m)^{v_r' - v_r''} \beta_1 \rho, \quad r \leq n_r$$

$$W_{gip} = v_{pi}'' - v_{pi}' + \frac{m_i}{m} \varepsilon_{gp} \sum_{r=R+1}^{n_r} (v_{ri}'' - v_{ri}') \varepsilon_{gr}^{-1} A_{rp}, \quad i \leq R, \quad p \leq R$$

$$W_{gip} = \delta_{ip}, \quad v_p = 0, \quad i > R, \quad p > R, \quad \delta_{ip} = 0, \quad i \neq p, \quad \delta_{ii} = 1, \quad x_j = \frac{m}{m_j} c_j \quad (1.3)$$

$$\sum_{j=1}^n v_{kj}' E_j = \sum_{j=1}^n v_{kj}'' E_j, \quad v_k' = \sum_{j=1}^n v_{kj}', \quad v_k'' = \sum_{j=1}^n v_{kj}'', \quad k \leq n_r$$

Здесь W_{gip} — компоненты матрицы W_g , v_r — компоненты столбца v , ε_{gr} — параметры, обратно пропорциональные числам Дамкелера гомогенных реакций; $v_{rj}', v_{rj}'', K_r^-, K_{pr}, n_r$ — стехиометрические коэффициенты, константа скорости обратной реакции, константа равновесия реакции с номером r , число гомогенных реакций, E_j — химические символы, A_{rp} — известные функции температуры, давления и состава [5]. В случае, когда реакции различаются лишь третьими частицами, можно ввести новые величины ε_{gr} , зависящие от концентраций [5]. В [5] массовая скорость

образования компонент в каждой простой гетерогенной каталитической реакции (предполагается, что известен механизм их протекания) выражена через отклонения от равновесия v_i^s во всех только независимых реакциях. За независимые реакции примем реакции адсорбции-десорбции, а также те же независимые реакции, что и в газовой фазе.

В теории идеального адсорбированного слоя Ленгмюра предполагается, что массовые скорости образования поверхностных соединений во всех гетерогенных каталитических реакциях равны нулю. Из этих условий выразим v_i^s для реакций адсорбции-десорбции через v_i , соответствующие системе независимых гомогенных реакций. Отсюда же найдем путем решения соответствующих нелинейных алгебраических уравнений все поверхностные концентрации θ_i как функции концентрации компонент x_i в газовой фазе у поверхности. Получим следующую формулу для R^s :

$$R^s = W_s \varepsilon_s^{-1} v, \quad \varepsilon_s = \text{diag}(\varepsilon_{s1} \dots \varepsilon_{sR} 1 \dots 1), \quad v_{n-1} = \beta^0 r_q \quad (1.4)$$

Компоненты матриц W_{sip} и ε_{si} при $i=1, \dots, R, p=1, \dots, R$ зависят от температуры, концентраций, давления и констант скоростей обратных реакций во всех гетерогенных реакциях, констант равновесия в реакциях адсорбции-десорбции и констант равновесия во всех независимых гомогенных реакциях.

Для перепадов поперек пограничного слоя концентраций продуктов реакций, химических элементов, а также энтальпии в зависимости от всех потоков (первое слагаемое в правой части) и от скоростей протекания гомогенных реакций (второе слагаемое) имеют место асимптотические формулы (1.5) [1]

$$\Delta Z = \frac{1}{\beta^0} \left(\frac{Sc}{l} \right)^{2/3} B \Lambda^{2/3} B^{-1} A_d J + B \Lambda^{1/3} B^{-1} A_w W_s \zeta_s v \quad (1.5)$$

$$\Delta Z \equiv Z - Z_e, \quad J = \frac{X}{\beta^0}, \quad \zeta_s = \varepsilon^{-1/3} \varepsilon_s^{-1}, \quad \varepsilon = \frac{l}{Sc} \rightarrow 0, \quad \zeta_s = O(1) \quad (1.6)$$

$$A_d = -\frac{\Gamma(1/3)}{3} \left(\frac{6}{\tau} \right)^{1/3} \left[E + B \Lambda^{-2/3} B^{-1} \left(\frac{\Gamma(2/3)}{\Gamma(1/3)} \left(\frac{6}{\tau} \right)^{1/3} A_{d1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{\Gamma(1)}{\Gamma(1/3)} \left(\frac{6}{\tau} \right)^{2/3} A_{d2} + \dots \right) \right] \quad (1.7)$$

$$A_w = -\frac{\Gamma(2/3)}{3} \left(\frac{6}{\tau} \right)^{2/3} \left[E + \left(\frac{6}{\tau} \right)^{1/3} \frac{\Gamma(1)}{\Gamma(2/3)} B \Lambda^{-1/3} B^{-1} A_{w1} + \dots \right]$$

$$\tau = f_{\eta\eta}'', \quad \Lambda^k = \text{diag}(\lambda_1^k \dots \lambda_{n-1}^k)$$

Здесь E — единичная матрица, $\Gamma(\alpha)$ — значение гамма-функции, λ_i — собственные значения матрицы $\pi(Z)$, B — матрица, столбцами которой являются собственные векторы матрицы π . Все величины в (1.5)–(1.7) берутся при значениях неизвестных на теле. Индекс w опущен. Матрицы $A_{d1}, A_{d2}, A_{w1} \dots$ содержат производные от π, B, B^{-1}, W и т. д. по η и, следовательно, в силу уравнений переноса из (1.1) являются функциями J, Z . Компоненты матриц A_{d1}, A_{d2}, A_{w1} и τ даны в [1].

Подставляя потоки из граничного условия на теле (1.1) в правую часть (1.5), в том числе в коэффициенты A_{d1}, A_{d2}, A_{w1} из (1.7) и принимая во внимание (1.4), получим систему алгебраических уравнений для определения концентраций продуктов реакций, величины диффузионного разделения химических элементов и энтальпии

$$\Delta Z = B \Lambda^{2/3} B^{-1} [A_d W_s \zeta_s + B \Lambda^{-1/3} B^{-1} A_w W_s \zeta_s] v, \quad \zeta_s = \left(\frac{Sc}{l} \right)^{2/3} \varepsilon_s^{-1} \quad (1.8)$$

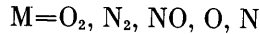
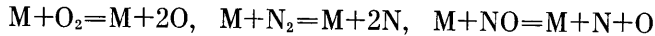
При известном составе и энтальпии все потоки к телу находятся по формуле

$$J=K\Delta Z$$

$$K=(1/\beta^0)(l/Sc)^{2/3}[A_d+BA^{-1/2}B^{-1}A_w(W_g\xi_g)(W_a\xi_a)^{-1}]^{-1}BA^{-1/2}B^{-1} \quad (1.9)$$

Здесь K — матрица коэффициентов тепломассообмена для случая произвольной многокомпонентной смеси, в которой одновременно протекают гомогенные и гетерогенные каталитические реакции.

2. Рассмотрим обтекание передней критической точки затупленного тела пятикомпонентным частично диссоциированным воздухом (O_2 , N_2 , NO , O , N). Пусть в потоке протекают гомогенные химические реакции



Детальный механизм гетерогенных каталитических реакций $O_2=2O$, $N_2=2N$, $NO=N+O$ рассматривать не будем. С хорошей точностью можно разбить компоненты в диффузионном отношении на две группы [3]: атомы $a(O, N)$ и молекулы $m(O_2, N_2, NO)$. Такая смесь характеризуется тремя числами Шмидта S_{aa} , S_{am} , S_{mm} и не является бинарной [3]. Собственные числа матрицы π будут следующими (термодиффузия и термоэффект не учитываются):

$$\lambda_1 = \frac{S_m}{S_{am}}, \quad \lambda_2 = \frac{S_a}{S_{am}}, \quad \lambda_3 = Le \equiv \frac{\sigma}{Sc}, \quad \lambda_4 = 1, \quad S_m = x_a S_{am} + x_m S_{mm}$$

$$S_a = x_a S_{aa} + x_m S_{am}, \quad x_a = x_4 + x_5, \quad x_m = x_1 + x_2 + x_3, \quad Sc = S_{am} \quad (2.1)$$

где Le , σ — числа Льюиса и Прандтля, а λ_1 — двукратный корень. Выпишем для данного случая блочные матрицы D и C , состоящие из первых четырех строк и столбцов матриц $BA^{-1/2}B^{-1}$ и $BA^{1/2}B^{-1}$, которые необходимы при расчете состава и величины концентрации химического элемента O на поверхности тела. Номера с 1 по 5 присвоены соответственно компонентам O_2 , N_2 , NO , O , N . Компонентам Z_i ($i=1, \dots, 4$) соответствуют концентрации O_2 , N_2 , NO и химического элемента O

$$D = \begin{pmatrix} P & 0 \\ D_4 & \lambda_2^{-1/2} \end{pmatrix}, \quad P = \lambda_1^{-1/2} E + \Delta_m U, \quad D_4 = (D_{41} D_{42} D_{43})$$

$$C = \begin{pmatrix} Q & 0 \\ C_4 & \lambda_2^{1/2} \end{pmatrix}, \quad Q = \lambda_1^{1/2} E - \Delta^m U, \quad C_4 = (C_{41} C_{42} C_{43})$$

$$U_{ij} = x_i, \quad i=1, 2, 3, \quad j=1, 2, 3, \quad \Delta_m = \Delta_1^\lambda (S_{mm}/S_{am} - 1), \quad \Delta^m = \lambda_1^{1/2} (1 + \lambda_1^{1/2}) \Delta_m$$

$$D_{41} = x_5 \Delta_a - (x_2 + 0,5x_3) \Delta_m, \quad D_{42} = (x_1 + 0,5x_3) \Delta_m - x_4 \Delta_a$$

$$D_{43} = 0,5((x_1 - x_2) \Delta_m + (x_5 - x_4) \Delta_a), \quad C_{41} = (x_2 + 0,5x_3) \Delta^m - x_5 \Delta^a$$

$$C_{42} = x_4 \Delta^a - (x_1 + 0,5x_3) \Delta^m, \quad C_{43} = 0,5((x_2 - x_1) \Delta^m + (x_4 - x_5) \Delta^a)$$

$$\Delta_a = \Delta_2^\lambda (S_{aa}/S_{am} - 1), \quad \Delta^a = \lambda_2^{1/2} (1 + \lambda_2^{1/2}) \Delta_a, \quad \Delta_i^\lambda = \lambda_i^{-1/2} (\lambda_i^{1/2} + \lambda_i^{1/2} + 1)^{-1}, \quad i=1, 2$$

Оценки показывают, что при определении концентрации химического элемента кислорода c^* на теле можно в выражениях для A_d и A_w в (1.7) пренебречь A_{d1} , A_{d2} и A_{w1} . Пусть температура поверхности тела не слишком высока, так что реакции диссоциации вблизи поверхности не существенны. Считаем также, что гетерогенная рекомбинация атомов кислорода и азота идет по первому порядку

$$r_1 = -\rho k_1 c_4, \quad r_2 = -\rho k_2 c_5, \quad c_a = c_4 + c_5 \quad (2.2)$$

где k_1 , k_2 — эффективные коэффициенты каталитичности. Будем пренебрегать малой концентрацией окиси азота.

Анализ проведем для двух интервалов изменения концентрации атомов на внешней границе пограничного слоя

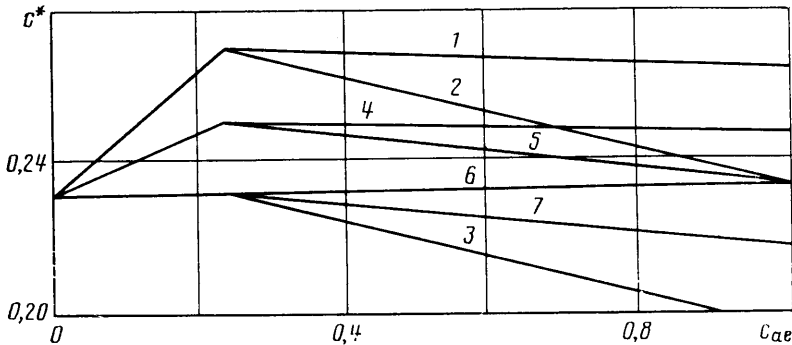
$$c_{ae} \in [0, 0,231], \quad c_{ie} = c_{ae}, \quad c_{se} = 0$$

$$c_{ae} \in [0,231, 1], \quad c_{ie} = 0,231, \quad c_{se} = c_{ae} - 0,231$$

Величина c^* найдена как функция от c_{ae} и безразмерных параметров, пропорциональных константам скоростей протекания гетерогенных (α_1, α_2) и гомогенных (D_1, D_2) химических реакций

$$\alpha_i = \frac{\Gamma(1/3)}{3} \left(\frac{6}{\tau} \right)^{1/3} S_{am}^{2/3} \beta^0 \rho k_i, \quad D_i = \frac{\Gamma(2/3)}{3} \left(\frac{6}{\tau} \right)^{2/3} \frac{S_{am}^{1/3}}{\varepsilon_{gi}}, \quad \frac{1}{\varepsilon_{gi}} = \frac{\rho^2 K_i^-}{(\nu+1) \beta m^2}$$

В случае химически замороженного течения, решив нелинейное урав-



Фиг. 1

нение для c_a (2.3), найдем концентрацию химического элемента кислорода c^*

$$(1+\alpha_1)(1+\alpha_2)c_a^2 - \{(\alpha_1+\alpha_2+2)c_{ae} - [(1+\alpha_2)c_{ae} + (\alpha_1-\alpha_2)c_{ie}]\}s_a\}c_a + (1-s_a)c_{ae}^2 = 0$$

$$s_a = (S_a/S_{am})^{-2/3}, \quad c^* = c_i + c_1, \quad s_m = (S_m/S_{am})^{-2/3}$$

$$c_i = \frac{s_a c_a c_{ie}}{(1+\alpha_1)c_a - (1-s_a)c_{ae}}, \quad c_1 = \frac{[\alpha_1 c_i + s_m(0,231 - c_{ie})](1-c_a)}{1-c_a - (1-s_m)(1-c_{ae})} \quad (2.3)$$

Результаты расчетов представлены на фиг. 1. Линии 1-7 соответствуют следующим парам (α_1, α_2) : $(\infty, 0)$, (∞, ∞) , $(0, \infty)$, $(1, 0)$, $(1, 1)$, $(0, 0)$, $(0, 1)$. Отношения S_{mm}/S_{am} и S_{aa}/S_{am} принимались равными 1,37 и 0,793. В случае идеально каталитической поверхности (линия 2) имеем

$$c^* = \frac{0,231 + (1-s_{mm})(c_{ie} - 0,231)}{1 - (1-s_{mm})(1-c_{ae})}, \quad s_{mm} = \left(\frac{S_{am}}{S_{mm}} \right)^{2/3} \quad (2.4)$$

Максимум c^* равен 0,27 и достигается при $c_{ae} = 0,231$, которое соответствует завершению диссоциации кислорода на внешней границе пограничного слоя. Разделение химического элемента O отсутствует при $c_{ae} = 1$. Эти результаты находятся в хорошем согласии с данными, полученными в [2, 3]. В случае химически нейтральной поверхности разделения элементов нет. Если поверхность тела обладает свойством избирательности каталитического воздействия на различные компоненты смеси, например если она идеально каталитическая по отношению к атомам кислорода и нейтральна к атомам азота (линия 1) или наоборот (линия 3), то с возрастанием концентрации атомов на внешней границе пограничного слоя

от 0,231 до 1 концентрация химического элемента кислорода лишь немного падает по сравнению со своим максимумом 0,27 (линия 1) или уменьшается от 0,231 до 0,194 (линия 3). При $c_{ae} \geq 0,231$, $\alpha_1 \rightarrow \infty$, $\alpha_2 = 0$ имеем формулу

$$c^* = \frac{0,231(1-c_{ae}-0,231s_a)}{0,231+(1-c_{ae})s}, \quad c_a = c_{ae} - 0,231s_a, \quad c_a = c_s, \quad s = \left(\frac{s_m}{\epsilon}\right)^{-2/3} \quad (2.5)$$

где необходимая для определения s_a и s концентрация c_a находится из второго уравнения в (2.5).

В отличие от случая идеально каталитической поверхности при полной диссоциации атомов на внешней границе пограничного слоя в зависимости от каталитических свойств поверхности имеем либо накопление, либо уменьшение концентрации элемента кислорода. При $c_{ae} \geq 0,231$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 \rightarrow \infty$ c^* находится из системы уравнений

$$c^* = \frac{0,231s_a c_a}{(s_a - 1)c_{ae} + c_a}, \quad c_a = c_{ae} - (c_{ae} - 0,231)s_a \quad (2.6)$$

из которой следует, что $c^* = c_a$.

В случае химически неравновесных течений задача о диффузионном разделении химических элементов сводится к решению следующей нелинейной системы алгебраических уравнений для неизвестных c_i , c_a , c^* :

$$w^1 + \xi \Delta_m (c^* - c_i) w^a + (\alpha_1 + s_m) c_i + s_m (0,231 - c^*) + \frac{m}{2m_a} s_m \Delta^m (c^* - c_i) (c_a - c_{ae}) - s_m c_{ie} = 0, \quad \xi = \frac{m}{2m_a} \lambda_1^{1/2}$$

$$w^a = w^1 + w^2, \quad w^1 = 4\xi s_m D_1 c_i^2, \quad w^2 = 4\xi s_m D_2 c_s^2$$

$$w^a = \left\{ s_m \left[1 + \frac{m}{2m_a} \Delta^m (1 - c_a) \right] (c_{ae} - c_a) - \alpha_1 c_i - \alpha_2 (c_a - c_i) \right\} [1 + \xi \Delta_m (1 - c_a)]^{-1},$$

$$\frac{m}{m_a} = \frac{2}{1 + c_a}$$

$$c^* = (0,231s_a + \Phi) (s_a - \Psi)^{-1}, \quad \Phi = \Phi_1 + 2\xi (\Phi_2 w^1 - \Phi_3 w^2) \quad (2.7)$$

$$\Phi_1 = \frac{m}{m_a} \{ s_a \Delta^a (c_{ae} c_i + (0,231 - c_{ie}) c_a - 0,5 s_m \Delta^m [(1 - c_{ae}) c_i + (1 - c_a) (0,231 - c_{ie})]) \}$$

$$\Phi_2 = (0,5 \Delta_m + \Delta_a) (c_a - c_i) - 0,5 \Delta_m, \quad \Phi_3 = (0,5 \Delta_m + \Delta_a) c_i$$

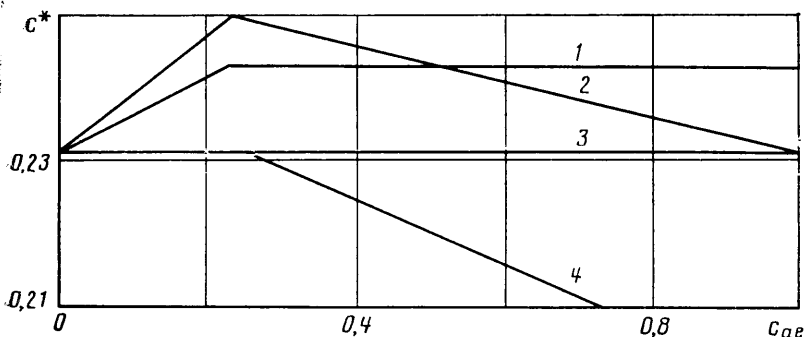
$$\Psi = \Psi_1 + \xi \Delta_m w^a, \quad \Psi_1 = \frac{m}{m_a} [0,5 s_m \Delta^m (1 - c_{ae}) - s_a \Delta^a c_a]$$

На фиг. 2 представлены результаты расчетов c^* для случая химически нейтральной поверхности. Линии 1-4 соответствуют следующим парам значений (D_1, D_2) : (10, 0), (∞, ∞), (0, 0), (0, 10).

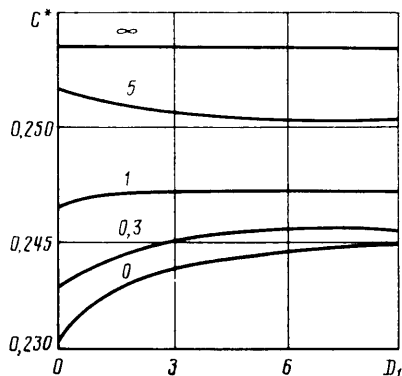
Если гомогенная рекомбинация кислорода идет интенсивно, а рекомбинация азота заморожена, то это приводит к накоплению элемента кислорода на теле (линия 1). В противном случае происходит накопление элемента азота (линия 4). При этом максимальная концентрация c^* достигается при $c_{ae} = 0,231$ и не превосходит 0,25 (линия 2). Для максимальной концентрации c^* имеем формулу

$$c^* = 0,231 [1 - (1 - (S_{mm}/S_{am})^{-1/2}) (1 - c_{ae})]^{-1} \quad (2.8)$$

В случае химически замороженного течения у идеально каталитической



Фиг. 2



Фиг. 3

поверхности для максимального значения c^* из (2.4) следует формула

$$c^* = 0,231 [1 - (1 - (S_{mm}/S_{am})^{-2/3}) (1 - c_{ae})]^{-1} \quad (2.9)$$

что дает максимум, равный 0,27, который превосходит значение 0,25, даваемое формулой (2.8). Это — следствие того факта, что в (2.8) и (2.9) отношение бинарных чисел Шмидта входит в разных степенях.

На фиг. 3 дано значение c^* при $c_{ae} = 0,231$ в зависимости от безразмерной константы скорости протекания гомогенной рекомбинации атомов кислорода D_1 и безразмерной константы скорости гетерогенной рекомбинации кислорода α_1 (числа у кривых).

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов О. Н. Асимптотическое интегрирование уравнений многокомпонентного химически неравновесного пограничного слоя // Аэродинамика гиперзвуковых течений при наличии вдува. М.: Изд-во МГУ, 1979. С. 6–39.
2. Анфимов Н. А. О некоторых эффектах, связанных с многокомпонентным характером газовых смесей // Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. 1963. № 5. С. 117–123.
3. Тирский Г. А. Определение эффективных коэффициентов диффузии в ламинарном многокомпонентном пограничном слое. // Докл. АН СССР. 1964. Т. 155. № 6. С. 1278–1281.
4. Громов В. Г. Химически неравновесный ламинарный пограничный слой в диссоциированном воздухе // Изв. АН СССР. МЖГ. 1966. № 2. С. 3–9.
5. Суслов О. Н. Асимптотическое исследование уравнений химически неравновесного пограничного слоя // Гиперзвуковые пространственные течения при наличии физико-химических превращений. М.: Изд-во МГУ, 1981. С. 138–213.

Москва

Поступила в редакцию
19.1.1987