

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИФФУЗИИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ
ВЫГОРАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ В НЕОДНОРОДНОМ ТУРБУЛЕНТНОМ
ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ**

Э. П. Волчков, П. В. Никитин, Е. И. Синайко

(Новосибирск)

На основании анализа уравнения бинарной диффузии в вязком подслое турбулентного пограничного слоя дается оценка влияния термодиффузии на концентрации компонент у непроницаемой стенки, на параметр проницаемости стенки и интенсивность выгорания реагирующей поверхности.

Приводятся экспериментальные результаты по выгоранию графитовой стенки в смесях воздуха с азотом, аргоном и гелием.

В исследованиях пограничного слоя с химическими реакциями ввиду сложности явления принимается ряд допущений о скоростях химических реакций, составе и свойствах газовой смеси. При этом, как правило, рассматривается только концентрационная диффузия, когда диффузионный поток вещества определяется градиентом концентраций.

В рамках теории пограничного слоя бародиффузией можно пренебречь, так как давление поперек пограничного слоя постоянно. Кроме того, в бинарном пограничном слое в определенных условиях могут существенно проявляться диффузионный термоэффект и термодиффузия [1-3].

Диффузионный термоэффект характеризует перенос тепла, обусловленный градиентом концентраций. Наличие этого эффекта приводит к тому, что температура адиабатической поверхности может существенно отличаться от температуры вне пограничного слоя.

Термодиффузия же представляет собой диффузионный перенос массы, возникающий при наличии градиента температуры внутри газовой смеси. Молекулы более тяжелого газа обычно диффундируют в направлении потока тепла, а более легкого — в обратном направлении. При этом интенсивность термодиффузии зависит как от характеристики температурного поля, так и от отношения молекулярных весов рассматриваемых компонент. Термодиффузия приводит к некоторому разделению компонент газовой смеси.

Таким образом, в неизотермическом бинарном пограничном слое термодиффузия может привести к существенному изменению концентраций на стенке.

Уравнение диффузии для бинарной смеси, записанное через весовые концентрации, с учетом термодиффузии имеет вид [1,2]

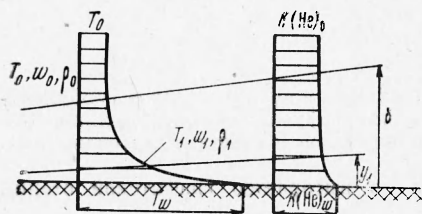
$$j_1 = \rho V_1 K_1 = -\rho D_{12} \left[\frac{\partial K_1}{\partial y} + k_T \frac{M_1 M_2}{M^2} \frac{\partial \ln T}{\partial T} \right] \quad (1)$$

Здесь j_1 , K_1 , V_1 — массовый поток, весовая концентрация первой компоненты и скорость, T — температура, ρ — плотность газа, M_1 , M_2 и M — молекулярные веса отдельных компонент и газовой смеси, D_{12} и D_T — коэффициенты концентрационной и термической диффузий, $k_T = = D_T / D_{12}$ — термодиффузионное отношение.

Величина термодиффузионного отношения сильно зависит от относительного содержания обоих компонентов, отношения масс и диаметров молекул. Поэтому иногда удобнее пользоваться термодиффузионной постоянной α , которая гораздо слабее зависит от концентрации компонент

$$\alpha = \frac{k_T}{n_1 n_2}, \quad \alpha(1 - K_1) K_1 = k_T \frac{M_1 M_2}{M^2} \quad (2)$$

Так как уравнения диффузии многокомпонентной смеси весьма сложны, рассмотрим сначала неоднородный бинарный пограничный слой при отсутствии химических реакций. Определим с учетом термодиффузии концентрации компонент на стенке. Затем с учетом полученных результатов



Фиг. 1

определим параметр проницаемости b_1^* на реагирующей стенке, характеризующий интенсивность химической эрозии поверхности.

Схема рассматриваемой задачи представлена на фиг. 1. Стенка с температурой на поверхности T_w обтекается смесью неоднородного газа (в дальнейшем рассматривается смесь воздуха с гелием или аргоном) с температурой в невозмущенном потоке T_0 .

На стенке развивается турбулентный пограничный слой толщиной δ . При этом ламинарный подслой имеет толщину y_1 с параметрами газа на границе подслоя ρ_1, w_1, T_1 . Как показывает анализ, проведенный в работе [4], при числах Прандтля $P < 1$ и Шмидта $S < 1$ можно не учитывать различие в скорости на границах динамического, теплового и диффузионного ламинарных подслоев.

Если бы температура была постоянной по толщине пограничного слоя, то были бы постоянными концентрации компонент газовой смеси. Температура же плавно меняется по всей толщине слоя от значения T_0 на внешней границе до значения T_w на поверхности, что и приводит к возникновению термодиффузии.

В области $y_1 < y < \delta$ преобладают характеристики турбулентного переноса. Здесь коэффициенты турбулентной диффузии D^* во много раз больше коэффициентов молекулярной концентрационной D_{12} и термической D_T диффузии. В таком случае, несмотря на наличие градиента температуры, термодиффузией в турбулентном ядре можно пренебречь. Концентрации же отдельных компонент смеси в области турбулентного ядра в первом приближении можно принять постоянными, т. е. концентрации на границе ламинарного подслоя равны их значениям в невозмущенном потоке

$$K(i)_{y=y_1} = K(i)_0$$

В области ламинарного подслоя (при $y < y_1$) определяющими являются процессы молекулярного переноса. Здесь имеют место максимальные градиенты температуры, что приводит к возникновению термодиффузии и градиента концентраций отдельных компонент смеси.

В пленочной теории течения в ламинарном подслое заменяется моделью течения Куэтта при предположении, что изменение параметров в направлении потока пренебрежимо мало по сравнению с их изменением в поперечном направлении. В таком случае из уравнения неразрывности следует, что поперечный поток вещества постоянен по сечению подслоя

$$i = \rho w_y = \text{const} = j_w$$

и если рассматривается непроницаемая стенка, то в ламинарном подслое $j = 0$.

Из уравнения (1), записанного с учетом соотношения (2), на непроницаемой стенке

$$\frac{\partial K}{\partial y} = -\alpha K(1-K) \frac{\partial \ln T}{\partial T} \quad (3)$$

следует, что в этом случае за счет термодиффузии в ламинарном подслое возникает такой градиент концентраций, при котором концентрационная диффузия будет уравновешивать термодиффузию.

При небольшом изменении концентрации за счет термодиффузии можно принять условие $\alpha \approx \text{const}$ и, интегрируя уравнение (3) по толщине ламинарного подслоя, получить

$$\int_{K_w}^{K_1} \frac{dK}{K(1-K)} = - \int_{T_w}^{T_1} \frac{\alpha}{T} dT \quad (4)$$

Отсюда при условии, что концентрация компоненты на границе подслоя равна ее значению в невозмущенном потоке $K_1 = K_0$, следует соотношение:

$$\frac{K_0(1-K_w)}{K_w(1-K_0)} = \left(\frac{T_w}{T_1}\right)^\alpha \quad (5)$$

или выражение для концентрации компоненты на стенке

$$K_w = \frac{K_0}{K_0 + (1-K_0)(T_w/T_1)^\alpha} \quad (6)$$

Для определения концентрации компонент на стенке необходимо знать температуру на границе вязкого подслоя T_1 . Как показано в работе [4], при течении сжимаемого газа на теплоизолированной поверхности и при теплоотдаче от стенки к газу, значение универсальной координаты η_1 близко к ее значению в несжимаемой жидкости, т. е. на границе ламинарного подслоя можно принять

$$\varphi_1 = \eta_1 = 11.6 \text{ или } \varphi_1 = w/v^* = 11.6 \quad (7)$$

Выразим динамическую скорость через коэффициент трения на стенке

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = w_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \sqrt{\frac{c_f}{2}} \quad (8)$$

Из соотношений (7) и (9) при условии подобия профилей скоростей и температур следует:

$$\omega = \frac{T_w - T_1}{T_w - T_0} = 11.6 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} \sqrt{\frac{c_f}{2}} \quad (9)$$

Отношение плотностей определяется из уравнения состояния и условия подобия профилей температур и концентраций. Из последнего соотношения можно определить значение температуры на границе ламинарного подслоя T_1 .

Рассмотрим условия, при которых проводились опыты на выгорающей графитовой поверхности [5,6]

$$T_0 \approx 290^\circ \text{ K}, T_w \approx 2000^\circ \text{ K}$$

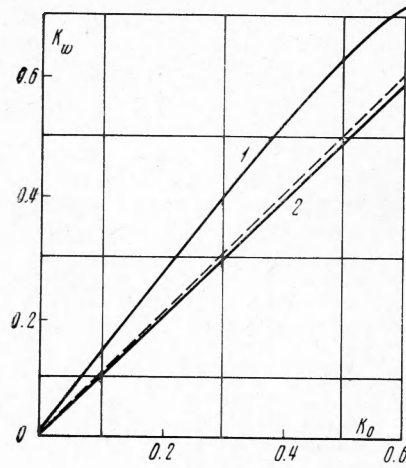
$$10^5 < R_x < 3 \cdot 10^6, c_f/2 = \text{St}P^{0.6} \approx 1.2 \cdot 10^{-3}$$

$c_f/2 = \tau_w/\rho_0 w_0^2$ — коэффициент трения, $St = j_c/\rho_0 w_0 b_1$ — диффузионное число Стантона, $R_x = \rho_0 w_0 x/\mu_0$ — число Рейнольдса по длине поверхности, $S = \mu/\rho D_{12}$ — число Шмидта.

Решая уравнение (9) относительно температуры на границе ламинарного подслоя, получим, что в этих условиях

$$T_1 = 840^\circ \text{K}, \quad \omega_1 \approx 0.68$$

Теперь по уравнению (6) можно определить концентрации компонент газовой смеси на стенке при отсутствии химических реакций и поперечного потока вещества. Были проведены расчеты для смесей воздуха с гелием и воздуха с аргоном. Значения термодиффузионной постоянной α в зависимости от концентрации компонент принимались в соответствии с данными работ [2,3].



Фиг. 2

Результаты расчетов концентрации гелия и аргона на стенке с учетом термодиффузии в зависимости от их концентрации в основном потоке представлены на фиг. 2. Как видно в рассматриваемых условиях за счет термодиффузии на непроницаемой стенке концентрация гелия (кривая 1) может увеличиваться на 20 ÷ 35%. Концентрация же аргона (кривая 2) уменьшается, но незначительно (до 2.5%). При отсутствии влияния термодиффузии концентрации компонент на стенке и в основном потоке равны между собой (пунктирная прямая).

При анализе влияния термодиффузии и диффузионного термоэффекта на теплообмен на пористой стенке в работах [3,7] рекомендуется учитывать эти эффекты при определении равновесной температуры стенки. При этом коэффициент теплоотдачи консервативен относительно эффекта термодиффузии. Аналогичная модель использовалась авторами в работе [5] при анализе эффективности газовой завесы на выгорающей поверхности. Было показано, что законы тепломассообмена остаются консервативными, если расчеты вести по «равновесной» концентрации компонент на стенке (по концентрации окислителя, определяемой с учетом газовой завесы при отсутствии химических реакций на поверхности). При этом интенсивность выгорания графитовой стенки определялась по следующей формуле:

$$j_c = \rho_0 w_0 St^* b_1^* \quad (10)$$

Здесь St^* — диффузионное число Стантона. В случае, когда на поверхности идет реакция $C + O \rightarrow CO$, параметр проницаемости определяется соотношением

$$b_1^* = \frac{3}{4} K(O)_w^* \quad (11)$$

где $K(O)_w^*$ — концентрация кислорода на стенке в рассматриваемых условиях при отсутствии химических реакций.

Таким образом, если законы тепломассообмена остаются консервативными по отношению к термодиффузии, то влияние термодиффузии на интенсивность выгорания будет сказываться только через параметр проницаемости b_1^* .

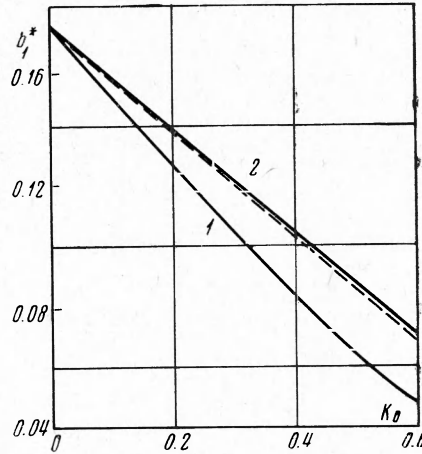
Результаты расчетов параметра проницаемости по формулам (6) и (11) при выгорании графита в смесях воздуха с гелием (кривая 1) или аргоном (кривая 2) представлены на фиг. 3 в зависимости от концентрации аргона или гелия в потоке. Пунктирная линия представляет собой расчет без учета термодиффузии. Как видно, в смеси воздуха с гелием влияние термодиффузии значительно сильнее, чем в смеси воздуха с аргоном. При этом в первом случае термодиффузия ведет к снижению интенсивности выгорания (до 30% при $K(\text{He})_0 \approx 0.6$), а во втором — к незначительному увеличению (до 2.5% при $K(\text{Ar})_0 \approx 0.6$).

На экспериментальной установке, описание которой дано в работе [5], были получены опытные данные по выгоранию графита ПГ-50 в потоке различных газовых смесей. Исследовалась интенсивность выгорания в потоке воздуха, разбавленного азотом (однородный пограничный слой), в смеси воздуха с гелием и воздуха с аргоном. Массовый поток газовой смеси в опытах $\rho_0 w_0 \approx 100 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{сек}$, температура газового потока $T_0 \approx 290^\circ \text{ К}$, температура графитовой стенки $T_w = 1880 \div 2025^\circ \text{ К}$.

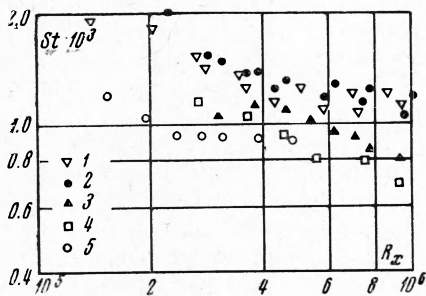
Результаты этих опытов, обработанные без учета влияния термодиффузии, представлены на фиг. 4. В этом случае экспериментальное значение критерия Стантона определялось (10), а параметр проницаемости определялся по концентрации кислорода в основном потоке

$$\text{St} = j_c / \rho_0 w_0 b_1, \quad b_1 = \frac{3}{4} K(\text{O})_0 \quad (12)$$

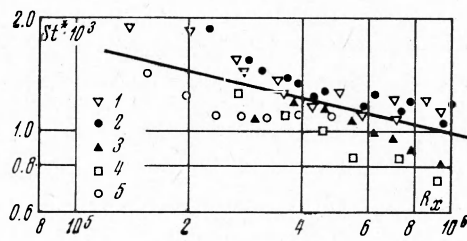
Как видно, результаты опытов в смесях воздуха с азотом $K(\text{N})_0 = 0.77 \div 0.874$ (точки 1) и в смесях воздуха с аргоном $K(\text{Ar})_0 = 0.31 \div 0.56$ (точки 2) практически совпадают вне зависимости от концентрации



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

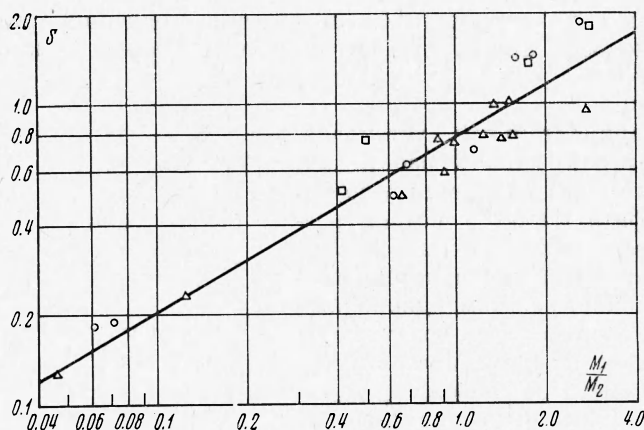
компонент в основном потоке. Опытные же данные, полученные на смеси воздуха с гелием, распадаются в зависимости от концентрации гелия в основном потоке и располагаются ниже (до 40%). Обозначения точек на фиг. 4 соответствуют следующим концентрациям гелия в основном потоке: точки 3—6.2%, 4—13%, 5—35%.

На фиг. 5 приведены те же опытные данные, обработанные с учетом влияния термодиффузии. При этом экспериментальное значение числа

Стантона определялось по формуле

$$St^* = J_c / \rho_0 w_0 b_1^*$$

где b_1^* находилось по формуле (11) с учетом влияния термодиффузии на концентрацию кислорода на стенке $K(O)_w^*$ при отсутствии химических



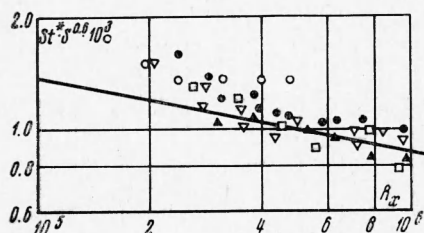
Фиг. 6

реакций (фиг. 3). Данные опытов сопоставляются с зависимостью [5]

$$St = 0.029 R_x^{-0.2} S^{-0.6} \Psi^{0.8} (\mu_w / \mu_0)^{0.2} \quad (13)$$

при условии $P \approx S = 0.71$. Здесь $\Psi = (St / St_0)_{R^{**}}$ — относительный закон тепломассообмена, учитывающий влияние неизотермичности и поперечного потока вещества на стенке, μ_w и μ_0 — вязкость газа на стенке и в основном потоке.

Необходимо иметь в виду, что в случае такой неоднородной смеси помимо термодиффузии существенно может сказываться изменение числа



Фиг. 7

Шмидта S в зависимости от концентрации компонент. На фиг. 6 представлены значения чисел Шмидта в зависимости от отношения молекулярных весов диффундирующего газа M_1 к молекулярному весу среды M_2 . Значения S определялись по коэффициентам бинарной диффузии, приведенным в работах [8-10]. Как видно, имеющиеся данные удовлетворительно обобщаются в такой простой форме, и для определения критерия S в первом приближении можно воспользоваться степенной зависимостью (при $0.05 < M_1 / M_2 < 5$)

$$S \approx 0.76 (M_1 / M_2)^{0.57} \quad (14)$$

При определении параметра проницаемости b_1^* на выгорающей графитовой поверхности рассматриваются уравнения диффузии кислорода и углерода [5], в которые входят коэффициенты диффузии кислорода и окиси углерода в газовой смеси. При определении числа S будем рассматривать многокомпонентную смесь как некоторую бинарную, где

кислород O_2 (или CO) диффундирует в смеси с молекулярным весом M_2 .

Результаты экспериментов по интенсивности выгорания графита в смесях воздуха с азотом, аргоном и гелием, построенные с учетом термодиффузии и числа S , представлены на фиг. 7. Обозначения опытных точек те же, что и на фиг. 4.

В такой обработке опытные данные, полученные в неоднородном пограничном слое (смесь воздуха с аргоном и гелием), удовлетворительно обобщаются с результатами опытов в однородном пограничном слое (смесь воздуха с азотом) и описываются зависимостью (13).

В условиях проведения экспериментов максимальное влияние термодиффузии на интенсивность выгорания не превышало 20%. Однако при других соотношениях компонент и в условиях большей неизотермичности влияние термодиффузии может быть более существенным.

Поступила 30 III 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. Г р ю К. Э., И б б с Т. Л. Термическая диффузия в газах. М., Гостехиздат, 1956.
2. Б а р о н. Термодинамические обобщенные силы в пограничных слоях. Ракетн. техн., 1962, № 7.
3. С п э р р о у, М и н к о в и ч, Э к к е р т. Диффузионные термоэффекты в потоке воздуха в окрестности критической точки при вдуве в пограничный слой газов с различными молекулярными весами. Ракетная техника и космонавтика, 1964, № 4.
4. Л а п и н Ю. В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. М., «Наука», 1970.
5. В о л ч к о в Э. П., З а у л и ч н ы й Е. Г., Л е о н т ь е в А. И., С и н а й к о К. И. Взаимодействие графитовой поверхности с турбулентным потоком газа в условиях существенной неизотермичности и при наличии завесы из нейтрального газа. Теплофизика высоких температур, 1970, т. 8, вып. 1.
6. Л е о н т ь е в А. И., В о л ч к о в Э. П., З а у л и ч н ы й Е. Г., С и н а й к о Е. И. Экспериментальное определение скорости уноса графита в условиях существенной неизотермичности. Физика горения и взрыва, 1967, т. 3, № 2.
7. К у т а т е л а д з е С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск, «Наука», 1970.
8. Г и р ш ф е л ь д е р Дж., К е р т и с с Ч., Б е р д Р. Молекулярная теория газон и жидкостей. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
9. Э к к е р т Э. Р., Д р е й к Р. М. Теория тепло- и массообмена. М.— Л., Госэнергоиздат, 1961.
10. Б р е т ш н а й д е р Ст. Свойства газов и жидкостей. М.— Л., «Химия», 1966.