

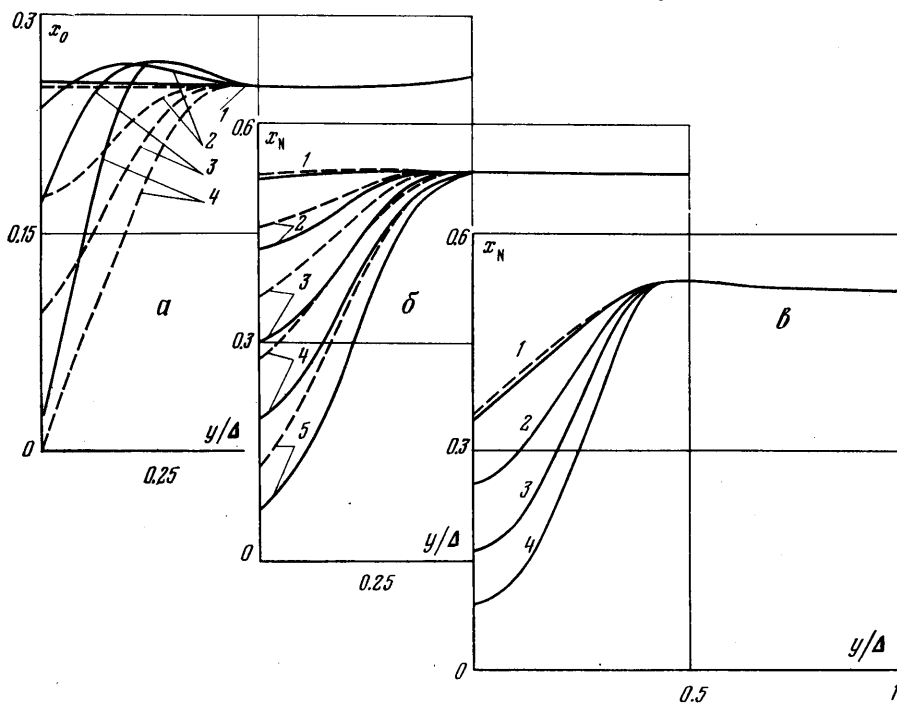
О МЕХАНИЗМЕ РЕКОМБИНАЦИИ АТОМАРНОГО АЗОТА ВБЛИЗИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОБТЕКАЕМОЙ ДИССОЦИИРОВАННЫМ ВОЗДУХОМ

В. Г. ВОРОНКИН, Г. Н. ЗАЛОГИН

(Москва)

Показано, что гетерогенная рекомбинация атомов азота на каталитически активной поверхности, омываемой диссоциированным воздухом, сопровождается интенсивной газофазной рекомбинацией азота в обменных реакциях, скорость которой определяется скоростью гетерогенной рекомбинации атомарного кислорода.

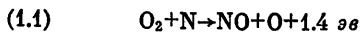
1. Для определения каталитичности поверхностей различных материалов в отношении гетерогенной рекомбинации атомов кислорода и азота в экспериментах стараются создать условия химически замороженного состояния газа в пограничном слое. В этом случае для обработки данных эксперимента можно пользоваться сравнительно простыми соотношениями для замороженного пограничного слоя на ката-



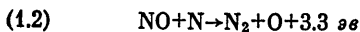
Фиг. 1

литически активной поверхности [1-3]. Оценки состояния газа обычно основываются на характерном времени трехчастичной газофазной рекомбинации атомов. Такой подход, безусловно оправданный для бинарной смеси молекул и атомов одного сорта, может приводить к значительным погрешностям в применении к многокомпонентным смесям, например к диссоциированному воздуху, так как в таких смесях могут идти достаточно быстрые бинарные химические реакции, результатом которых является рекомбинация атомов или диссоциация молекул, на что указывалось в [4].

В случае обтекания диссоциированным воздухом поверхности, каталитической в отношении рекомбинации атомов кислорода и азота, в пристеночной области реализуется следующий механизм обменных реакций. При каталитической рекомбинации на стенке образуются молекулы кислорода O_2 , вступающие в газофазную обменную реакцию с образованием молекулы NO



которая затем также вступает в обменную реакцию



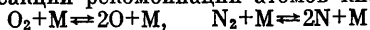
Суммарный эффект этих двух реакций заключается в рекомбинации двух атомов азота в молекулу азота и в диссоциации молекулы O_2 , образовавшейся в результате каталитической рекомбинации на стенке. Определяющей в этом механизме реакции является каталитическая рекомбинация атомов кислорода на стенке.

Образование дополнительного количества молекул N_2 приводит к выделению значительного количества энергии, что влечет за собой повышение температуры в пограничном слое и увеличение теплового потока.

Таким образом, реакции (1.1), (1.2) в совокупности с реакцией каталитической рекомбинации атомов кислорода составляют механизм газовой рекомбинации атомов азота, идущей параллельно с гетерогенной каталитической рекомбинацией их и инициируемой каталитической рекомбинацией кислорода на стенке.

2. Эти выводы относительно роли газовой рекомбинации азота в обменных реакциях вблизи каталитической поверхности были получены на основании численных расчетов неравновесного вязкого ударного слоя в критической точке кругового цилиндра, обтекаемого в поперечном направлении диссоциированным гиперзвуковым потоком воздуха. Аналогичные выводы получены и из расчетов гиперзвукового обтекания цилиндра потоком недиссоциированного воздуха. Постановка задачи и метод решения такие же, как в [5, 6].

В расчетах учитывалось неравновесное протекание реакций (1.1), (1.2), каталитических реакций рекомбинации атомов кислорода и азота, а также реакций



(2.1)



Расчеты соответствуют полной энтальпии потока $H=7200$ ккал/кг, скорости потока $V_\infty=4700$ м/сек, давлению торможения за прямым скачком уплотнения $p_0^*=0.15$ атм, радиусу цилиндра $r=1.25$ см. Массовые концентрации атомарного кислорода и атомарного азота в набегающем потоке были равны соответственно: $c_1=0.21$, $c_2=0.41$, концентрация окиси азота $NO - c_3=0$. В расчетах производилось независимое варьирование констант скорости каталитической рекомбинации атомов кислорода $k_w^{(1)}$ и азота $k_w^{(2)}$. Температура поверхности цилиндра принималась равной $400^\circ K$.

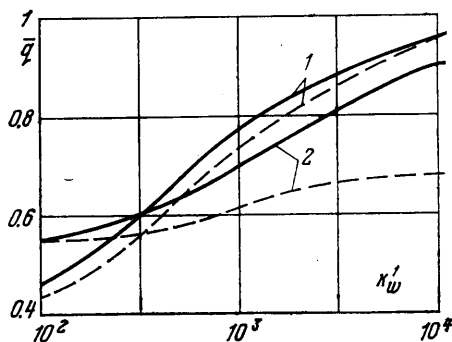
На фиг. 1, а и б для случая $k_w^{(1)} = k_w^{(2)}$ представлены профили молярных концен-

траций $x_i = n_i/n$ кислорода x_0 и азота x_N в ударном слое при различной каталитической активности поверхности. Сплошные кривые получены для неравновесного ударного слоя, пунктирные — при исключении обменных реакций. Кривым 1-4 на фиг. 1, а соответствуют значения $k_w=0, 3 \cdot 10^2, 10^4, 10^5$ см/сек, а кривым 1-5 на фиг. 1, б соответствуют значения $k_w=0, 10^2, 3 \cdot 10^2, 6 \cdot 10^2, 2 \cdot 10^3$ см/сек. Видно, что учет обменных реакций приводит в соответствии с вышесказанным к увеличению концентрации атомов кислорода и к уменьшению концентрации атомов азота. Влияние величины константы скорости каталитической рекомбинации атомов кислорода на газофазную рекомбинацию атомов азота проиллюстрировано на фиг. 1, в. Представленные здесь профили концентрации атомарного азота получены при $k_w^{(2)}=300$ см/сек и при различных значениях $k_w^{(1)}$. Кривым 1-4 соответствуют значения $k_w^{(1)}=0, 6 \cdot 10^2, 2 \cdot 10^3, 10^5$ см/сек. Видно, что увеличение скорости каталитической рекомбинации кислорода интенсифицирует процесс газофазной рекомбинации атомов азота, приводя к уменьшению их концентрации.

Обычно оценку термодимического состояния газа в пограничном слое делают без учета влияния свойств поверхности [7]. Однако, как показано выше, в многокомпонентном пограничном слое на каталитической стенке скорость химических реакций может существенно зависеть от каталитичности поверхности. Действи-

тельно, при $k_w^{(1)} = k_w^{(2)} = 0$ (некаталитическая стенка) распределение концентраций (фиг. 1, в) свидетельствует о заморозенности химических процессов в пограничном слое; в то же время при $k_w > 0$ (кривые 2-4) и при тех же внешних условиях обтекания имеется существенное отличие от заморозенного состояния, обусловленное влиянием обменных реакций.

На фиг. 2 приведены результаты расчетов теплового потока в зависимости от $k_w^{(1)}$ при $k_w^{(2)} = 300$ см/сек для равновесного (сплошные) и заморозенного (пунктир) режимов течения в



Фиг. 2

ударном слое. Значения тепловых потоков отнесены к величине, полученной для идеально каталитической стенки при $k_w^{(1)} = k_w^{(2)}$. При $k_w^{(1)} = k_w^{(2)}$ (кривые 1) различие тепловых потоков в неравновесном и замороженном случаях невелико, в то же время приближение замороженного течения совершенно неприменимо при $k_w^{(1)} \neq k_w^{(2)}$ (кривые 2).

Как видно из поведения кривых, при высокой каталитичности стенки по отношению к рекомбинации атомов кислорода обменные реакции могут значительно повысить тепловой поток по сравнению с замороженным случаем. Применительно к рассмотренному режиму течения ($H_{00}=7200$ ккал/кг) это превышение составляет ~34%.

С уменьшением давления влияние рассматриваемого эффекта уменьшается. При давлении $p_0^*=0.015$ атм и прочих равных условиях обтекания превышение теплового потока за счет обменных реакций по сравнению с замороженным случаем составляет ~8%.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что при определении тепловых потоков к поверхности с конечной каталитической активностью, а также при экспериментальном определении каталитичности в потоке воздуха необходимо проведение точных численных расчетов неравновесного пограничного или ударного слоя, а расчеты тепловых потоков по формулам для замороженного пограничного слоя (типа формулы Гуларда) могут привести к неверным результатам.

Поступила 29 XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Goulard R. On catalytic recombination rates in hypersonic stagnation heat transfer. *Jet Propulsion*, 1958, vol. 28, No. 11.
2. Pope R. B. Stagnation point convective heat transfer in frozen boundary layers. *AIAA Pap.*, 1968, No. 15.
3. Андерсон. Влияние каталитической активности поверхности на тепловой поток в окрестности критической точки. *Ракетная техника и космонавтика*, 1973, т. 11, № 5.
4. Rosner D. E., Cibrian R. Non-equilibrium stagnation region aerodynamic heating of hypersonic glide vehicles. *AIAA Pap.*, 1974, No. 755.
5. Воронкин В. Г., Гераскина Л. К. Неравновесный ламинарный пограничный слой диссоциирующего воздуха на осесимметричных телах. *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1969, № 3.
6. Воронкин В. Г. Неравновесное вязкое течение многокомпонентного газа в окрестности критической точки затупленного тела. *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1971, № 2.
7. Агафонов В. П., Вергушкин В. К., Гладков А. А., Полянский О. Ю. Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М., «Машиностроение», 1972.

УДК 533.6.12

ОПТИМАЛЬНЫЕ ТУПОНОСЫЕ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ В ГАЗЕ РАЗЛИЧНОЙ РАЗРЕЖЕННОСТИ

А. И. БУНИМОВИЧ, А. В. ДУБИНСКИЙ

(Москва)

К настоящему времени опубликовано большое число работ, посвященных оптимизации формы тел, обтекаемых потоком газа. Однако большинство исследований проводилось для сверхзвукового и гиперзвукового течений в предельном случае «сплошной среды» [1], и имеются лишь отдельные работы [1-3], в которых рассматривалось обтекание разреженным газом, в основном свободномолекулярным потоком. В данной статье задачи оптимизации формы рассмотрены при гиперзвуковом обтекании тела потоком газа различной разреженности; с использованием численных методов исследовано влияние числа Рейнольдса на форму и сопротивление оптимальных тел вращения.

1. **Постановка задачи.** Форма образующей обтекаемого тела вращения определяется функцией $y(x)$, $0 \leq x \leq x_f$, $y(0) = a$; тело имеет плоскую носовую часть, невозмущенный поток направлен по оси x .