

УДК 533.6.011.6 : 536.24

© 1991 г.

**П. Н. БАРОНЕЦ, А. Ф. КОЛЕСНИКОВ, С. Н. КУБАРЕВ,
И. С. ПЕРШИН, А. С. ТРУХАНОВ, М. И. ЯКУШИН**

СВЕРХРАВНОВЕСНЫЙ НАГРЕВ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ПЛИТКИ В ДОЗВУКОВОЙ СТРУЕ ДИССОЦИИРОВАННОГО ВОЗДУХА

Представлены результаты измерений и численных расчетов распределений температуры поверхностей теплозащитных плиток с однородными и неоднородными каталитическими покрытиями, обтекаемых дозвуковыми потоками диссоциированного воздуха в индукционном плазмотроне. Данные измерений согласуются с расчетными профилями температуры поверхности, полученными из численного решения уравнений Навье – Стокса для химически неравновесного течения диссоциированного азота. Результаты сопоставляются с данными летного эксперимента на орбитальном корабле «Спейс Шаттл» по влиянию разрыва каталитичности плиточного покрытия на «сверхравновесный» скачок температуры поверхности.

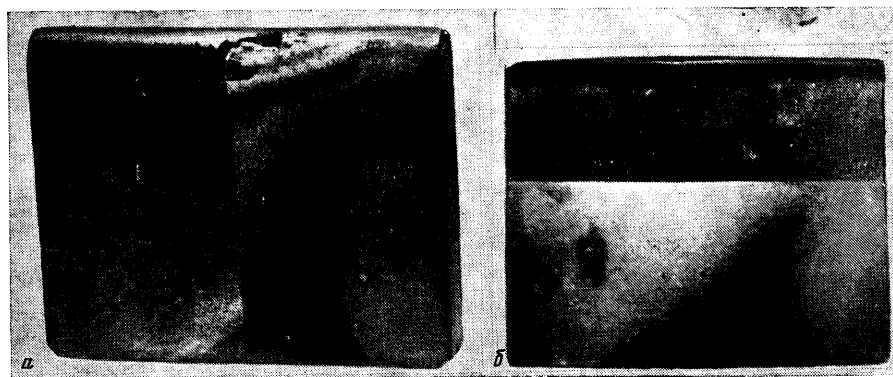
1. Основу тепловой защиты несущей поверхности орбитального корабля (ОК) «Буран» составляют плитки, выполненные из волокнистого кварцевого материала [1]. Согласно результатам исследований каталитических свойств теплозащитных материалов, проведенных в ИПМ АН СССР на индукционном плазмотроне ВГУ-2 при давлениях 0,1–0,3 ат, в диапазоне температур поверхности $T_w=900-1500$ К в потоке диссоциированного воздуха поверхность плиточного покрытия практически некаталитична по отношению к реакциям гетерогенной рекомбинации атомов кислорода и азота.

Однако несущая поверхность ОК может быть неоднородной по своим каталитическим свойствам, например, из-за загрязнений плиточного покрытия.

В условиях неравновесного протекания реакций рекомбинации атомов теплообмен диссоциированного пограничного слоя с неоднородной каталитической поверхностью имеет важную особенность: при перетекании диссоциированного газа с некаталитической поверхности на каталитический участок (или неоднородность) имеет место скачок теплового потока до уровня, превосходящего тепловой поток к полностью каталитической поверхности [2–6].

Этот эффект сверхравновесного нагрева обусловлен тем, что при одинаковых внешних условиях обтекания газ в диссоциированном неравновесном пограничном слое на некаталитической поверхности за счет повышенной концентрации атомов имеет более высокую энтальпию по сравнению с потоком над каталитической поверхностью. Эта избыточная энергия и вызывает дополнительный нагрев каталитического участка, расположенного ниже по потоку [2].

Сверхравновесный скачок температуры наблюдался в летном эксперименте на теплозащитных плитках ОК «Спейс Шаттл», покрытых высококаталитической черной шпинелью, а также на моделях с разрывом каталитических свойств поверхностей в экспериментах на электродуговых установках [5]. В [5] получены согласованные полетные и расчетные данные



Фиг. 1

по величине скачка температуры на каталитическом участке, расположенном на расстоянии $S \approx 0,15L$ ($L=32,7$ м) от точки носового затупления. Ниже по потоку ($S \approx 0,4L$) расчетные значения T_w на каталитическом участке превышали экспериментальные значения примерно на 100 К.

В первых экспериментах по теплообмену поверхностей плиточной теплозащиты с разрывом каталитических свойств, проведенных в ИПМ АН СССР на индукционном плазмотроне ВГУ-2 в 1984 г., использовалась модель из волокнистого кварцевого материала в форме пластины с размерами $45 \times 57 \times 10$ мм³ с цилиндрическим затуплением передней кромки (фиг. 1). С двух сторон на плиточное покрытие методом газотермического напыления в струе арговодородной плазмы наносился тонкий слой высококаталитической хромоникелевой шпинели $NiCr_2O_4$. Модель вводилась в дозвуковую струю диссоциированного азота плазмотрона ВГУ-2 так, чтобы линия пересечения плоскостей симметрии модели была близка к оси струи. Эксперимент проводился при давлении 0,1 ат, расходе 2,8 г/с и мощности по анодному питанию 37,4 кВт.

На фото (фиг. 1, а) видно, что в результате термического воздействия потока на поверхность разрушен сегмент высококаталитического участка на цилиндрическом затуплении вблизи критической точки. Видны также изменения высококаталитического участка поверхности в кормовой части модели (фиг. 1, б), что свидетельствует о значительном повышении температуры этого участка поверхности по сравнению с температурой поверхности выше по потоку.

2. Эксперименты проводились в дозвуковом потоке воздуха на плазмотроне ВГУ-3-200 с разрядным каналом диаметром 200 мм при следующих параметрах: мощность анодного питания 150 кВт, давление 0,015 ат, расход воздуха 8,5 г/с, энтальпия $H_s = 23,5$ МДж/кг, температура $T_s = 7400$ К, скорость $V_s = 650$ м/с (нижний индекс s соответствует значениям на оси симметрии на срезе канала плазмотрона). Использовались теплозащитные плитки размером $150 \times 150 \times 50$ мм³, аналогичные элементам плиточной теплозащиты ОК «Буран». В качестве высококаталитического материала использовалась хромоникелевая шпинель $NiCr_2O_4$, которая наносилась на лицевую поверхность плитки методом газотермического напыления в струе арговодородной плазмы. Толщина напыленного слоя шпинели составляла 40–80 мкм. В диапазоне температур поверхности 700–1500 К интегральная излучательная способность шпинели $\epsilon_n = 0,85$; с возрастанием температуры ϵ_n шпинели уменьшается (при $T_w = 1800$ К $\epsilon_n = 0,75$).

Неравновесный теплообмен дозвукового потока диссоциированного воздуха с поверхностью плитки изучался на трех моделях: на обычной плитке, на плитке с лицевой поверхностью, полностью покрытой шпинелью, и на плитке с высококаталитическим покрытием в виде кольца шириной 15 мм и внутренним радиусом 60 мм. Плитки устанавливались в цилиндрическую маску диаметром 280 мм, которая располагалась нормально к оси канала плазмотрона на расстоянии 360 мм от его среза так, чтобы обтекание модели дозвуковой высокоэнтальпийной струей было близко к осесимметричному.

Нагретая поверхность плитки наблюдалась с помощью поворотного металлического зеркала с высокими отражающими свойствами на длине волны $\lambda_1=5$ мкм. Двумерное распределение температуры поверхности модели регистрировалось при помощи термовизионной системы АГА-780 с последующей расшифровкой. Расшифровка включала учет потерь на зеркале и иллюминаторе, а также использование данных по интегральной излучательной способности шпинели и спектральной излучательной способности плиточного покрытия. В центре плиток и на внутреннем крае каталитического кольца проводились измерения температуры также с помощью оптического пирометра ЭОП-66.

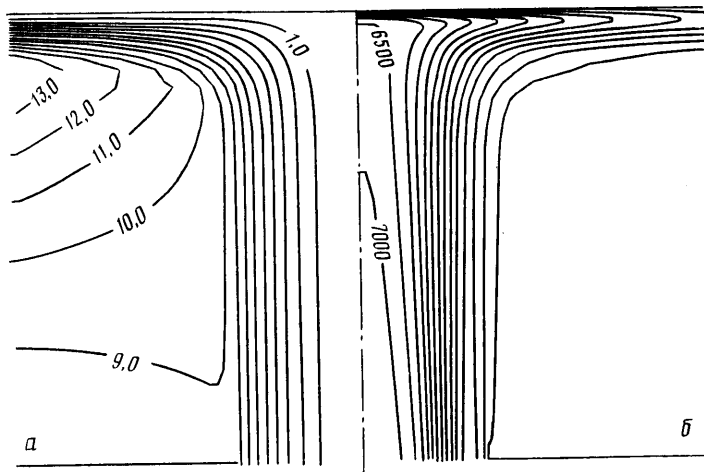
Для измерения T_w пирометрическими методами необходимы данные по спектральной излучательной способности поверхности на рабочей длине волны прибора. В центре плитки, полностью покрытой шпинелью, зарегистрированы следующие значения яркостной температуры T_b поверхности: для $\lambda_1=5$ мкм 1730 К (термовизор АГА-780), для $\lambda_2=0,65$ мкм 1760 К (пирометр ЭОП-66). При уровне температур поверхности $T_w \approx 1750$ К естественно предположить, что $\epsilon_{\lambda_2}=\epsilon_n=0,75$. Это значение использовалось при измерении T_w на шпинели с помощью пирометра ЭОП-66. Из условия согласования температур поверхности, измеренных двумя приборами, следует, что $\epsilon_{\lambda_1}=0,93$. Это значение использовалось при определении поля температур по показаниям термовизора. Для плиточного покрытия принималось значение $\epsilon_{\lambda_2}=0,98$. Величины погрешностей измерений температур плиточного покрытия и шпинели составляли соответственно 20 и 40 К.

3. Для условий экспериментов с плитками, установленными в цилиндрическую маску, выполнены расчеты натекания на плоскую преграду струи диссоциированного азота с параметрами, соответствующими указанному выше дозвуковому режиму работы плазмотрона ВГУ-3-200 на воздухе.

Дозвуковое обтекание моделей неравновесной струей вязкого диссоциированного азота рассчитывалось путем численного решения уравнений Навье — Стокса, упрощенных для случая $M \ll 1$. Постановка задачи приведена в [7]. В качестве граничных условий на срезе канала плазмотрона использовались данные измерений температуры, скоростного напора и энтальпии для дозвукового режима на воздухе, параметры которого указаны в разд. 2. Неравновесный профиль массовой концентрации атомов азота в этом сечении подбирался из условия соответствия расчетного распределения энтальпии вдоль оси струи экспериментальному, которое измерялось с помощью энтальпиемера.

На плоской поверхности ставилось условие прилипания. Предполагалось, что стенка теплоизолированная и в каждой точке поверхности реакция гетерогенной рекомбинации атомов идет по первому порядку.

Для эффективной константы скорости гетерогенной рекомбинации атомов азота на высокотемпературном кварце в соответствии с данными [8] принималось значение $K_{wN}=1$ м/с. Поверхность, покрытая шпинелью, считалась идеально каталитической ($c_{N_w}=0$).



Фиг. 2

Константа скорости газофазной реакции $N+N+M \rightleftharpoons N_2+M$ ($M=N, N_2$) учитывалась в соответствии с данными [9].

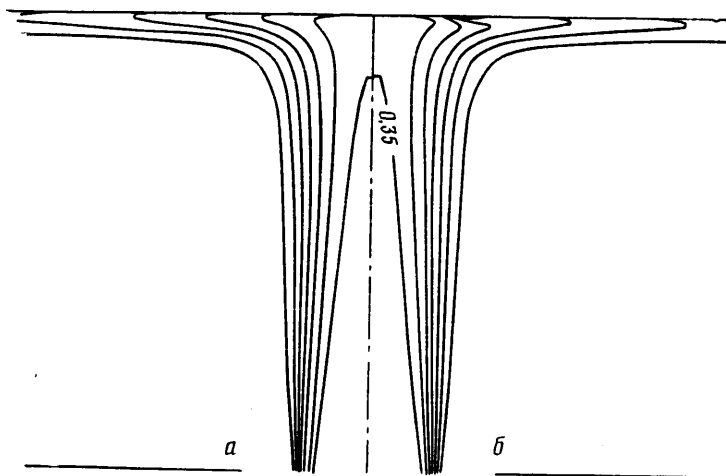
Численное решение эллиптической задачи для четырех зависимых переменных — функции тока, завихренности, энтальпии и концентрации атомов — находилось с использованием известной разностной схемы [10] методом Гаусса — Зайделя.

Точность вычисления теплового потока тестировалась сравнением с результатами расчетов q_w в критической точке модели в рамках уравнений пограничного слоя конечной толщины [7] с использованием разностной схемы четвертого порядка аппроксимации [11]. На пограничный слой приходилось около 30 узлов, у стенки шаг сетки по нормали минимальный: $\Delta z/R_c = 2,5 \cdot 10^{-4}$; в радиальном направлении шаг сетки постоянный: $\Delta r/R_c = 2,5 \cdot 10^{-2}$ (R_c — радиус канала). При расчете обтекания неоднородной поверхности в окрестности каталитического участка число узлов сетки в радиальном направлении равномерно увеличивалось в 2 раза. Вычислительная погрешность определения температуры поверхности не превышает 20 К.

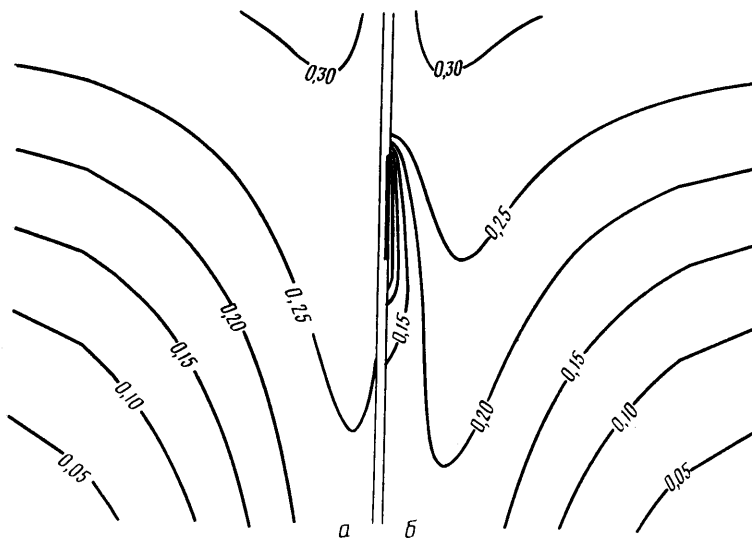
Расчетные картины натекания дозвуковой неравновесной струи диссоциированного азота на теплоизолированную низкокatalитическую ($K_{wN} = 1$ м/с) плоскость представлены на фиг. 2–4. На фиг. 2 приведены линии тока с шагом по расходу 1 г/с (а) и изотермы с шагом по температуре 500 К (б); на фиг. 3, 4 — линии постоянной массовой концентрации атомарного азота с шагом 0,05 при обтекании однородной поверхности (а) и поверхности с высококatalитической кольцевой вставкой (б).

Отметим, что полученная численно структура течения для условий эксперимента на плазмотроне ВГУ-3-200 качественно согласуется с численным решением задачи о натекании дозвуковой струи диссоциированного азота на плоскость для режима плазмотрона ВГУ-2 при энтальпии $H_c = 2,48 \cdot 10^7$ м²/с² и давлении 0,1 ат [7].

Рассматриваемое течение имеет следующие особенности. Во-первых, линии тока нагретого газа — прямые вплоть до расстояния $\sim R_c$ от стенки, т. е. после выхода из канала плазмотрона нагретый газ как бы течет в цилиндрической трубе длиной $\sim 3R_c$, образованной окружающим более плотным газом. Во-вторых, в центральной части потока имеется протяженное высокотемпературное ядро, практически достигающее внешней границы пограничного слоя. В-третьих, на однородной низкокatalитиче-



Фиг. 3



Фиг. 4

ской поверхности отсутствует диффузионный пограничный слой, но такой слой формируется в окрестности каталитической вставки, которая на фиг. 4, а показана жирной линией.

Результаты экспериментального и численного исследования теплообмена теплоизолированных поверхностей с высокоэнтальпийной дозвуковой струей представлены на фиг. 5, где приведены измеренные и вычисленные профили температуры на поверхности модели с чистым плиточным покрытием (1), со сплошным (2) и неоднородным (3) шпинеlevым слоем.

На двух моделях с однородными поверхностями температура плавно убывает с увеличением расстояния от критической точки, причем в центральной части поверхности, покрытой шпинеlevью, температура почти на 400 К выше, чем на низкокatalитическом плиточном покрытии, где $T_w \approx 1370$ К. На поверхности третьей модели профиль температуры немонотонно-

тонный — на внутренней границе каталитического кольца имеет место скачок температуры на 450 К, причем значение T_w на 100 К превышает температуру однородной каталитической поверхности вследствие эффекта сверхравновесного нагрева.

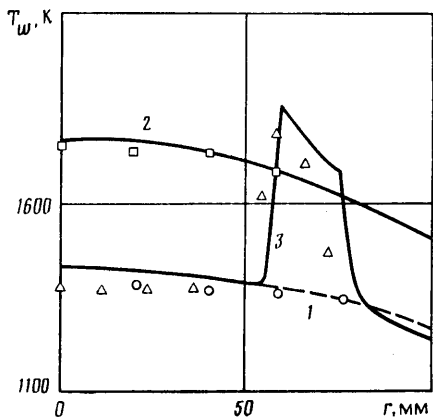
Численное решение хорошо согласуется с экспериментальными данными как для поверхностей с однородными каталитическими свойствами, так и для поверхности с разрывом каталитических свойств (см. фиг. 5).

Сопоставление экспериментальных и расчетных распределений температуры поверхности показывает, что при высоких температурах и давлениях $p \sim 10^{-2}$ ат «штатное» покрытие плитки имеет низкую каталитическую активность по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов ($K_w \leq 1$ м/с), что согласуется с полученными ранее на плазмотроне ВГУ-2 данными при давлениях 0,1–0,3 ат.

Сравним полученные экспериментальные и расчетные данные по распределениям температур на теплозащитных плитках с результатами измерений температуры поверхности ОК «Спейс Шаттл» в полете STS-2 при скорости спуска 6,7 км/с на высоте 71 км с углом атаки 40° [5]. По значениям температуры на поверхности плитки данные настоящего лабораторного эксперимента хорошо согласуются с температурой на поверхности плиточной теплозащиты ОК вблизи стыка с носовым обтекателем ($S=4,9$ м) [5]. Для высококаталитических поверхностей соответствия лабораторного и полетного экспериментов нет. В потоке плазмотрона температура однородной шпинелевой поверхности на 270 К выше, чем расчетная температура каталитической поверхности аппарата.

В связи с этим можно говорить о том, что в струе плазмотрона при указанных выше параметрах моделируется температурный пограничный слой на первом ряду плиток поверхности ОК для указанных выше траекторных параметров.

Отметим, что в легком эксперименте для указанной точки траектории на плитке, покрытой шпинелью и расположенной на расстоянии 4,9 м от носка аппарата, зарегистрирован заброс температуры на величину 100 К по сравнению с равновесным значением температуры на каталитической поверхности. Таким образом, данные настоящего эксперимента по измерению величины сверхравновесного нагрева практически совпадают с результатами, полученными в летном эксперименте [5], хотя уровень температур на высококаталитическом кольце в потоке плазмотрона существенно выше, чем на каталитической плитке, расположенной на несущей поверхности ОК вблизи линии растекания.



Фиг. 5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозино-Лозинский Г. Е. Полет «Бурана» // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. 1989. М.: Наука, 1990. С. 6–21.
2. Chung P. M., Liu S. W., Mirels H. Effect of discontinuity of surface catalycity on boundary layer flow of dissociated gas // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1963. V. 6. № 3. P. 193–210.
3. Rakich J. V., Lanfranco M. J. Numerical computation of space shuttle laminar heating and surface streamlines // J. Spacecraft and Rockets. 1977. V. 14. № 5. P. 265–272.

4. Беспалов В. Л., Воронкин В. Г. К теории каталитического калориметра // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 1. С. 192–195.
5. Rakich J. V., Stewart D. A., Lanfranco M. J. Results of a flight experiment on the catalytic efficiency of the space shuttle heat shield // AIAA Pap. 1982. № 944. 14 p.
6. Гершбейн Э. А., Казаков В. Ю., Щелин В. С. О гиперзвуковом вязком ударном слое на поверхности со скачкообразным изменением каталитической активности // Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23. № 5. С. 916–921.
7. Колесников А. Ф., Кубарев С. Н., Якушин М. И. Численное исследование неравновесного течения диссоциированного азота в дозвуковой струе индукционного плазмотрона // Численные методы механики сплошной среды. Новосибирск. 1986. Т. 17. № 2. С. 106–113.
8. Кузнецов В. М., Кузнецов М. М., Колесников А. Ф., Якушин М. И. Теоретические и экспериментальные задачи гетерогенного катализа на поверхностях, обтекаемых диссоциированным газом // Моделирование в механике. Новосибирск. 1987. Т. 1(18). № 3. С. 83–104.
9. Воронкин В. Г., Яхлаков Ю. В. Экспериментальное исследование теплообмена в окрестности критической точки при неравновесных физико-химических превращениях и определение константы скорости рекомбинации азота // Изв. АН СССР. МЖГ. 1973. № 3. С. 128–135.
10. Госмен А. Д., Пан В. М., Ранчел А. Х. и др. Численные методы исследования течений вязкой жидкости. М.: Мир, 1972. 324 с.
11. Петухов И. В. Численный расчет двумерных течений в пограничном слое // Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратные формулы. М.: Наука, 1964. С. 304–325.

Москва

Поступила в редакцию
6.VI.1990