

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА В КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ СПУСКАЕМОГО АППАРАТА «EXPERT»

А.Ф. Колесников, А.Н. Гордеев, С.А. Васильевский

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

Аннотация

Разработан новый технический подход к испытаниям теплозащитных материалов (ТЗМ), основанный на концепции локального моделирования теплообмена, при относительно высоких давлениях (170-540 гПа) и низких энтальпиях (7.7–12 МДж/кг). С использованием расширенных возможностей 100-киловаттного плазматрона ВГУ-4 в дозвуковых потоках диссоциированного воздуха выполнено моделирование нагрева в критической точке аппарата «EXPERT» для образцов SiC и проведены эксперименты по теплообмену в дозвуковых потоках диссоциированного азота образцов SiC, графита и углерод-углерода. Для условий теплообмена, близким к траекторным параметрам нагрева аппарата «EXPERT», из сравнения измеренных и рассчитанных тепловых потоков и температур поверхности образцов материалов определены каталитические активности материалов SiC, графит В-1 и углерод-углерод по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов кислорода и азота.

SIMULATION OF STAGNATION POINT HEATING AND PREDICTING SURFACE CATALYSITY FOR THE EXPERT RE-ENTRY CONDITIONS

The new technical approach for the testing thermal protection materials (TPM) based on the Local Heat Transfer Simulation concept at the relatively high pressure (170-540 hPa) & low enthalpy (7.7-12 MJ/kg) is developed. The simulation of the stagnation point heating SiC surface in subsonic dissociated air flows and SiC, graphite and carbon-carbon surfaces in subsonic dissociated nitrogen flows are carried out using the extended capabilities of the 100-kW IPG-4 plasmatron. Catalytic efficiencies of the reference sintered SiC, graphite V-1 and C-C materials with respect to heterogeneous recombination of the atomic oxygen and nitrogen are predicted close to the EXPERT re-entry conditions through multiparameter CFD modeling heat transfer for the plasmatron tests conditions and comparison with the data of stagnation point heat transfer rates and measurements of the samples surface temperatures.

1. ВВЕДЕНИЕ

100-киловаттный плазматрон ВГУ-4 широко использовался для моделирования термохимического взаимодействия высокоэнтальпийных потоков воздуха, азота, кислорода и углекислого газа и определения каталитических свойств ТЗМ по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов O, N, молекул CO для различных условий входа в атмосферы Земли и Марса [1–6]. В данной работе на основе расширенных возможностей плазматрона ВГУ-4, методологии локального моделирования теплообмена [7–9], диагностики и численного моделирования дозвуковых течений диссоциированного воздуха и теплообмена для условий экспериментов на плазматроне предложен новый технический подход к термохимическим испытаниям материалов и определению их каталитических свойств для условий входа в атмосферу аппарата «EXPERT» [10]. На основании этого подхода установлены корреляции между параметрами дозвуковых течений воздуха в плазматроне и траекторными параметрами аппарата.

2. РАСШИРЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАЗМОТРОНА ВГУ-4 С СЕКЦИОНИРОВАННЫМ СОПЛОМ

Плазматрон ВГУ-4 – универсальная научно-исследовательская установка с индукционным нагревом газов мощностью 100 кВт и разрядным каналом диаметром 80 мм. Технические характеристики плазматрона ВГУ-4 приведены в таблице 1. Установка может

работать на воздухе, азоте, кислороде, углекислом газе и других газах. В дозвуковом режиме работы на воздухе рабочая область установки включает диапазон энтальпий $10 \div 40$ МДж/кг и давлений торможения $10^3 \div 10^5$ Па. В этом плазматроне энтальпия и давление в набегающем струйном потоке могут регулироваться независимо и непрерывно. Это достоинство в комбинации с высокой воспроизводимостью параметров потоков химически чистой плазмы различных газов обеспечивают уникальные возможности установки ВГУ-4 для определения каталитических свойств ТЗМ на основе измерений и расчетов теплообмена для контролируемых условий эксперимента [1-6].

Таблица 1. Параметры плазматрона ВГУ-4

Параметр	ВГУ-4
Год ввода в эксплуатацию	1988
Мощность генератора, кВт	12÷72
Частота, МГц	1.76
Давление в барокамере, гПа	6÷1000
Расход воздуха, г/с	2÷6
Длина разрядного канала, мм	400
Диаметр разрядного канала, мм	80

Специфическая проблема возникла, когда наш метод [1–3], разработанный для определения каталитической активности ТЗМ в потоках сильно диссоцииро-

ванных газов (воздух, азот, кислород, углекислый газ), применялся для потоков с относительно низкой энтальпией. Даже в условиях стабильного существования разряда при низкой анодной мощности генератора дозвуковой низко энтальпийный поток был недостаточно стационарным и подходящим для адекватного численного моделирования и определения коэффициентов каталитической рекомбинации атомов О и N. В частности, было невозможно получить высоко качественный дозвуковой поток воздуха, в котором диссоциирован кислород, но не диссоциированы молекулы азота, для того, чтобы определить вклад в тепловой поток рекомбинации атомарного кислорода и коэффициент каталитической рекомбинации γ_0 . Необходимость изучения вклада в нагрев поверхности аппарата «EXPERT» эффекта каталитической рекомбинации атомов кислорода при скоростях входа меньше 5 км/с мотивировала поиски расширения возможностей плазмотрона ВГУ-4 в область низких энтальпий.

Техническое решение было найдено за счет поджата потока воздушной плазмы в коническом сопле с выходным сечением диаметром 40 мм с последующим цилиндрическим участком того же диаметра. Водоохлаждаемое секционированное сопло с конической частью и двумя цилиндрическими насадками длиной 40 и 80 мм было спроектировано, изготовлено и успешно испытано. В конфигурации с секционированным соплом были реализованы устойчивые параметры работы плазмотроны и стабильные параметры дозвуковых потоков воздушной плазмы в диапазоне анодной мощности генератора 20÷72 кВт. В диапазоне давлений 100÷600 гПа при массовом расходе воздуха 2.4 г/с нижняя граница рабочей области плазмотрона расположена около значения анодной мощности 17 кВт и стабильные параметры потока плазмы реализуются при мощностях выше 20 кВт для длин цилиндрического насадка 40÷120 мм.

На рис. 1 представлена фотография дозвуковой струи воздуха, истекающей из секционированного сопла с цилиндрическим насадком длиной 80 мм. Выбранный способ удлинения канала обеспечивает некоторое снижение энтальпии и улучшает качество потока при низких энтальпиях на выходе из канала. Вследствие ускорения потока в конической части насадка такая конфигурация канала обеспечивает достаточно высокий уровень тепловых потоков в критической точке модели даже при низких энтальпиях потока.

3. ДИАГНОСТИКА ДОЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУХА

Дозвуковые потоки диссоциированного воздуха в плазмотроне ВГУ-4 были реализованы в диапазоне давлений 170-540 гПа в соответствии со значениями давления торможения в критической точке аппарата «EXPERT» в диапазоне высот 52.6÷43 км.

Диагностика дозвуковых потоков воздуха и азота включала измерения следующих параметров набегающих потоков и параметров теплообмена:

- 1) энтальпии;
- 2) динамического давления и статического давления на стенке барокамеры;
- 3) тепловые потоки в критической точке модели к охлаждаемой медной поверхности (медь – стандартный высоко каталитический материал в потоках диссоциированного воздуха [1]);

- 4) температура поверхности образца ТЗМ;
- 5) утечки тепла с тыльной стороны образца ТЗМ.

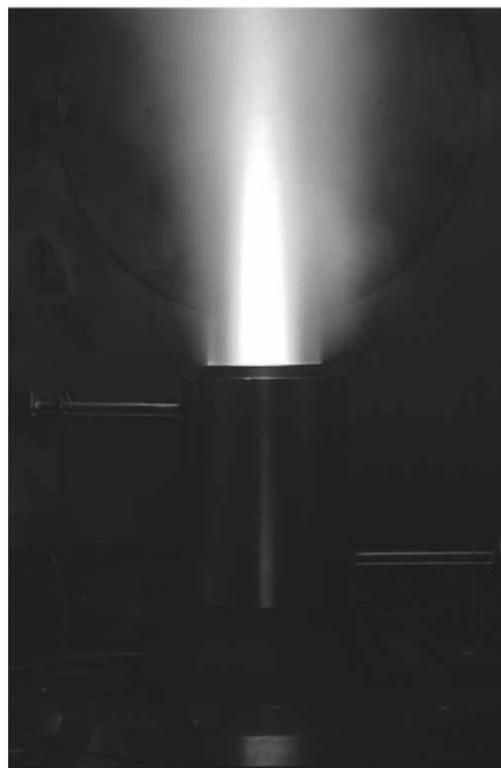


Рис. 1. Дозвуковой поток воздушной плазмы из секционированного разрядного канала при давлении 170 гПа и массовом расходе 2.4 г/с

Прямые измерения энтальпии дозвуковых потоков воздуха за секционированным соплом выполнены без цилиндрического насадка и с насадками длиной 40 и 80 мм с помощью энтальпиемера путем отбора воздуха из набегающего потока при давлении 170 гПа. Как видно из рис. 2, значения энтальпии получены в интервале 4 – 28 МДж/кг. В дозвуковых потоках воздуха с энтальпией около 5 МДж/кг (температура воздуха около 3000 К) молекулы кислорода частично диссоциированы, а молекулы азота не диссоциированы. Такие условия эксперимента могут быть использованы для определения коэффициента каталитической рекомбинации атомов кислорода γ_0 .

Динамическое давление измерялось вдоль оси дозвуковых струй воздуха с помощью водоохлаждаемых трубок Пито различной геометрии. Когда образцы ТЗМ испытываются с помощью стандартной евромодели диаметром 50 мм, используются трубки Пито той же геометрии с отверстием диаметром 14 мм. Измерения динамического давления выполнены с помощью дифференциального датчика давления Motorola-163PC01D36 с точностью ± 3 Па. Статическое давление в затопленном пространстве измерялось через отверстие в барокамере. Восстановление скорости дозвукового потока диссоциированного воздуха по измеренным значениям динамического давления и энтальпии является неотъемлемой частью экспериментально-расчетной диагностики.

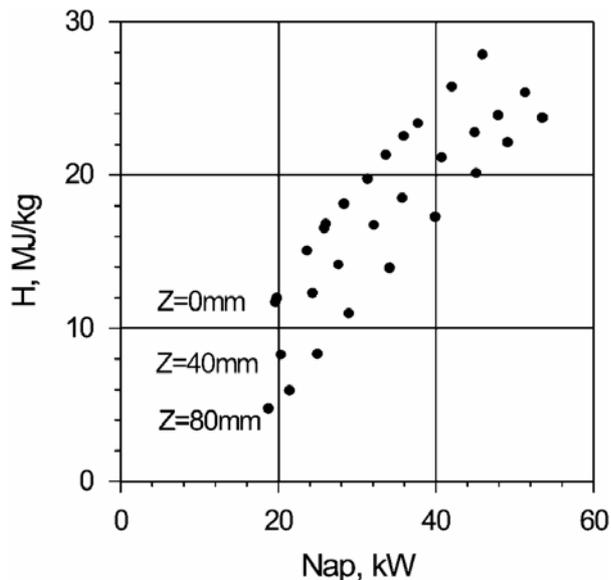


Рис. 2. Энтальпия дозвукового потока воздуха на оси струи после секционированного разрядного канала при различной длине цилиндрического насадка, давлении 170 гПа, массовом расходе 2.4 г/с на расстоянии 40 мм от среза сопла

Измерялись тепловые потоки в критической точке водоохлаждаемой евромодели диаметром 50 мм стандартной геометрии, изготовленной из меди. Для измерений тепловых потоков к холодной стенке ($T_W \approx 300$ К) использовался стационарный проточный калориметр из меди (медь в дозвуковых потоках воздуха и азота имеет наиболее высокую каталитическую активность [1]). Тепловоспринимающая медная поверхность калориметра диаметром 14 мм полировалась до зеркального качества. Для улучшения воспроизводимости измерений поверхность калориметра, установленного в модель, тренировалась в потоке воздушной плазмы в течение нескольких минут.

Тепловой поток к охлаждаемой поверхности калориметра определяется по измеряемой разности температур на выходе и входе в калориметр и расходу воды. Точность измерения теплового потока к холодной стенке ($T_W \approx 300$ К) $\pm 5\%$.

Данные измерений тепловых потоков в критической точке евромодели к охлаждаемой медной поверхности для секционированного разрядного канала плазмотрона ВГУ-4 с цилиндрическим насадком длиной 40 мм и диаметром 40 мм для давлений 170, 370 и 540 гПа приведены на рис. 3, где точки соответствуют измерениям в разных экспериментах. Из рис. 3 видно, что тепловые потоки реализованы в широком диапазоне 40÷290 Вт/см².

4. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ ТЗМ

Для термохимических испытаний образцов ТЗМ в осесимметричной конфигурации обтекания использовалась водоохлаждаемая державка, оснащенная евромоделью диаметром 50 мм стандартной геометрии, изготовленной из спеченного карбида кремния. Образцы SiC, установленные в эту модель, обтекались дозвуковыми потоками диссоциированного воздуха. Модель располагалась на расстоянии 40 мм от среза цилиндрического насадка. Испытания в дозвуковых потоках воздуха проведены при давлениях 170 и

540 гПа. Параметры набегающего потока калибровались по заданному тепловому потоку к холодной каталитической стенке – соответственно 77 (режим 1) и 133 (режим 2) Вт/см².

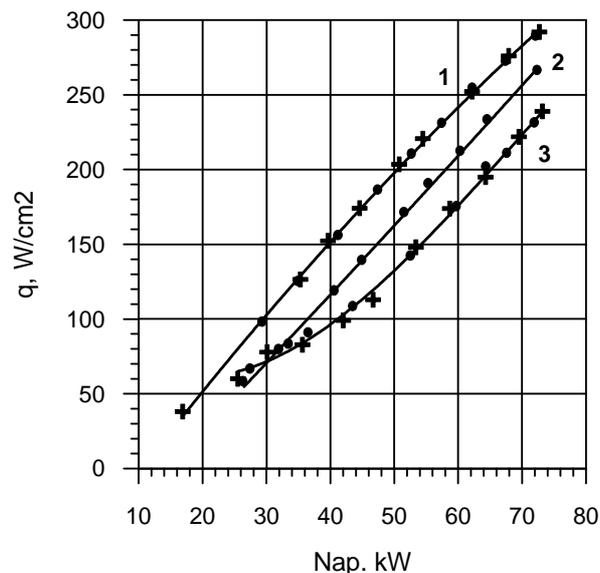


Рис. 3. Тепловой поток в критической точке модели к холодной медной поверхности в дозвуковом потоке диссоциированного воздуха в зависимости от мощности генератора по анодному питанию при массовом расходе 2.4 г/с на расстоянии от среза сопла до модели 40 мм. P=170 (1), 370 (2), 540 (3) гПа

Образцы SiC, графита В-1 и углерод-углерода также были испытаны в дозвуковых потоках диссоциированного азота при давлении 170 гПа и заданном тепловом потоке к холодной каталитической стенке 77 Вт/см².

В этих испытаниях, после установления стационарного режима теплообмена измерялись два параметра теплообмена: температура поверхности образца ТЗМ (с помощью пирометра) и утечки тепла с тыльной стороны образца (с помощью калориметра). Яростная температура поверхности образца измерялась пирометром ПОВ-80 с исчезающей нитью ($\lambda=0.65$ мкм) со средней погрешностью ± 10 К. Истинная температура поверхности T_W определялась с учетом спектральной излучательной способности образца и спектральной прозрачности кварцевого оптического окна барокамеры.

Тепловой поток в критической точке образца определялся по формуле

$$q_W = \varepsilon_{th} \sigma T_W^4 + q_c, \quad (1)$$

где ε_{th} – интегральная полусферическая степень черноты поверхности; σ – константа Стефана – Больцмана; q_c – плотность утечек теплового потока с тыльной поверхности образца. Значение $\varepsilon_{th}=0.85$ было взято для образцов SiC и $\varepsilon_{th}=0.80$ – для образцов из графита В-1 и углерод-углерода.

5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование дозвуковых течений плазмы и высокоэнтальпийных химически реагирующих воздуха и углекислого газа теплообмена для условий экспериментов на плазмотроне является неотъем-

емлемой частью диагностики, определения каталитических характеристик поверхности ТЗМ и экстраполяции условий эксперимента на условия входа тел в атмосферу [1–6]. Для рассматриваемых условий экспериментов в плазмотроне в дозвуковых потоках воздуха ($p=170\div 540$ гПа) проблема численного моделирования течений плазмы воздуха и азота делится на следующие три части:

- 1) осесимметричное закрученное течение равновесной индукционной плазмы воздуха и азота в секционированном разрядном канале;
- 2) осесимметричное дозвуковое ламинарное течение равновесно диссоциированного воздуха и азота в области, ограниченной срезом канала, поверхностью модели и стенкой барокамеры;
- 3) неравновесный пограничный слой в критической точке модели диссоциированного воздуха (O_2 , N_2 , NO , O и N) и азота (N_2 и N).

В первой задаче учитываются плазмодинамические эффекты силы Лоренца и выделение джоулева тепла в разрядном канале. Двумерные уравнения Навье – Стокса записаны для полной энтальпии и трех компонент скорости, включая тангенциальную компоненту за счет закрутки потока. Расчет напряженности электрического поля в разрядном канале плазмотрона проводится в упрощенной квазиодномерной постановке и сводится к решению уравнения для усредненной по времени амплитуды тангенциальной составляющей напряженности высокочастотного электрического поля [11].

Конечно-разностные аналоги уравнений Навье – Стокса записываются для конечных объемов и решаются методом, аналогичным методу SIMPLE [12]. Окончательная система линейных алгебраических уравнений решается с помощью модифицированного метода неполной факторизации. Упрощенное уравнение для усредненной по времени комплексной амплитуды электрического поля решается эффективным методом прогонки.

В численном расчете в число задаваемых параметров входят расход воздуха в разрядном канале G , мощность N_{pl} , вкладываемая в разряд. Значение N_{pl} задавалось по измеренной в эксперименте мощности генератора по анодному питанию N_{ap} , умноженной на к. п. д. плазмотрона [11]. При совместном расчете течения воздушной плазмы и электромагнитного поля в разрядном канале соответствующий ток в индукторе определялся в процессе решения.

На рис. 4 показаны изолинии функции тока и изотермы в разрядном секционированном канале ВГУ-4 для течения равновесной плазмы воздуха при давлении $p=170$ гПа, массовом расходе $G=2.4$ г/с, мощности в плазме $N_{pl}=30$ кВт, частоте электрического тока $f=1.76$ МГц.

Для численного моделирования осесимметричного обтекания модели в барокамере дозвуковым ламинарным потоком равновесно диссоциированного воздуха использовались уравнения Навье – Стокса, записанные для полной энтальпии и двух компонент скорости (ионизация и закрутка потока несущественны для данной задачи). Профили параметров течения на срезе разрядного канала, полученные из решения первой задачи, использовались в качестве граничных условий. Для численного решения второй задачи использова-

лись тот же метод SIMPLE [12] и аналогичная вычислительная техника, как для расчета течений плазмы в разрядном канале.

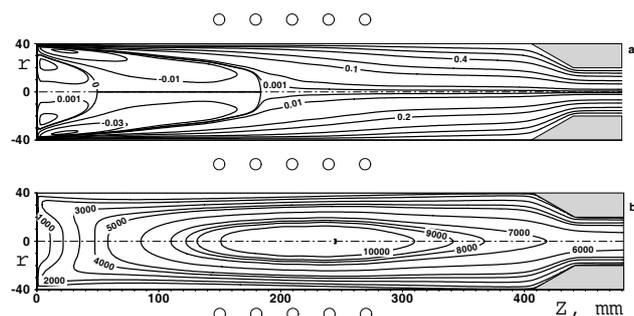


Рис. 4. Изолинии функции тока (a) и изотермы, К (b) течения равновесной плазмы воздуха в секционированном разрядном канале плазмотрона ВГУ-4 при $p=170$ гПа, $G=2.4$ г/с, $N_{pl}=30$ кВт

Дозвуковой поток диссоциированного воздуха и азота можно считать равновесным при давлениях выше 50 гПа. Особенность настоящего подхода к численному моделированию обтекания модели вязким реагирующим газом заключается в том, что химически равновесное течение воздуха (азота) около модели используется в качестве внешнего решения в постановке задачи о неравновесном пограничном слое.

На рис. 5 показаны линии тока и изотермы дозвукового химически равновесного течения воздуха около евромодели в том же режиме, что на рис. 4.

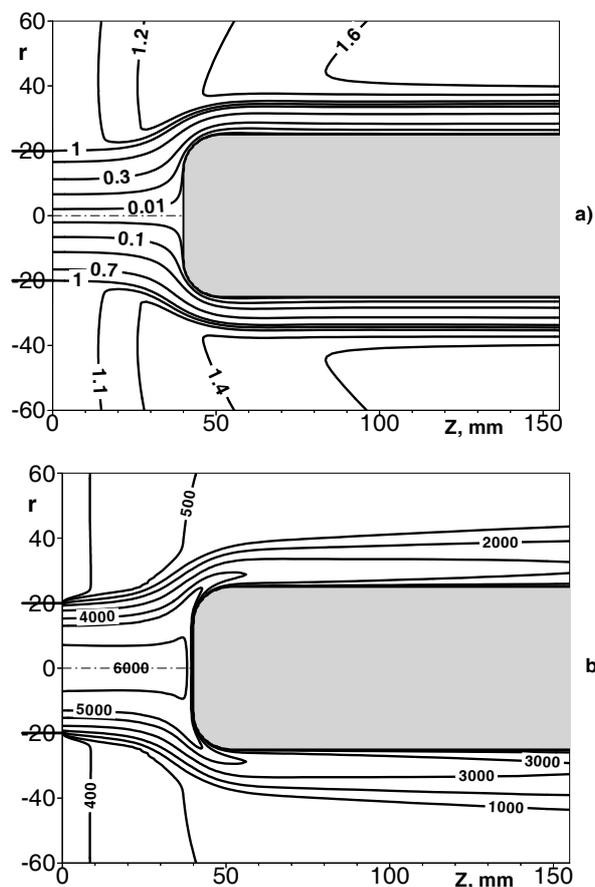


Рис. 5. Линии тока (a) и изотермы К, (b) дозвукового течения равновесной плазмы воздуха около модели при $p=170$ гПа, $G=2.4$ г/с, $N_{pl}=30$ кВт

Характерной особенностью дозвукового течения является наличие изобарической и изотермической зоны между срезом разрядного канала и моделью (за исключением пограничного слоя).

Задача о неравновесном пограничном слое конечной толщины в окрестности точки торможения на модели решается в одномерной постановке [1-3]. Такой подход позволяет эффективно разделить решение уравнений Навье – Стокса для внешнего потока и расчеты теплового потока в критической точке модели. Одномерная математическая модель пограничного слоя для химически реагирующего газа учитывает конечную толщину пограничного слоя и завихренность потока на его внешней границе за счет трех безразмерных параметров, которые рассчитываются из решения второй задачи в рамках уравнений Навье – Стокса. Соответствующая компьютерная программа может работать автономно в широком диапазоне параметров набегающего дозвукового потока, температуры поверхности и коэффициента каталитической рекомбинации. Для быстрого и точного решения обыкновенных дифференциальных уравнений одномерного пограничного слоя использовалась разностная схема четвертого порядка аппроксимации.

Расчеты пограничного слоя проведены для химически неравновесной 5-компонентной смеси (O_2 , N_2 , NO , O , N) и бинарной смеси (N_2 , N) при следующих предположениях:

- 1) колебательные степени свободы молекул возбуждены равновесно, химическая кинетика однетемпературная;
- 2) поверхностные каталитические реакции $O+O+S \rightarrow O_2+S$ и $N+N+S \rightarrow N_2+S$ первого порядка с одним эффективным коэффициентом каталитической рекомбинации γ_w , и поверхность некаталитична по отношению к образованию молекул NO .

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА

Если дозвуковой поток воздуха (азота) в плазматроне равновесный, то трех измеряемых параметров – теплового потока в критической точке модели к медной охлаждаемой поверхности, динамического давления в потоке и статического давления на стенке барокамеры – достаточно для численного восстановления параметров набегающего потока. Все параметры на оси симметрии потока (скорость, энтальпия, температура, химический состав) определяются из многопараметрических расчетов тепловых потоков к абсолютно каталитической стенке в предположении, что на внешней границе пограничного слоя имеет место термодиффузионное равновесие.

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТАЛИТИЧНОСТИ ТЗМ

Расчитанные тепловые потоки в критической точке модели для двух режимов испытаний ТЗМ в потоках диссоциированного воздуха и одного режима испытаний ТЗМ в потоке диссоциированного азота представлены в виде карт тепловых потоков на рис. 6–8. Сплошные кривые 1–7 соответствуют значениям γ_w в интервале значений 1 – 0. Штрих-пунктирные линии соответствуют замороженному пограничному слою на некаталитической поверхности, штриховые линии – тепловой поток к равновесно-радиационной стенке

$q_w = \varepsilon \sigma T_w^4$. Все три карты в верхнем левом углу присоединены к соответствующим значениям измеренного теплового потока к холодной медной поверхности модели, которые приняты в качестве тепловых потоков к абсолютно каталитической стенке.

Положения экспериментальных точек на картах тепловых потоков определяются двумя координатами – измеренным значением температуры поверхности T_w и значением q_w , вычисленным по формуле (1). В соответствии с методом [1], коэффициент каталитической рекомбинации γ_w для данного материала определяется положением соответствующей экспериментальной точки по отношению к кривым $\gamma_w = \text{const}$. Один режим дозвукового обтекания модели потоком диссоциированного газа дает одну экспериментальную точку для фиксированной геометрии модели соответственно одно значение γ_w для данных значений температуры поверхности и давления.

Из рис. 6 для поверхности SiC при температуре $T_w = 1650$ К и давлении $p = 170$ гПа находим $\gamma_w = 4 \cdot 10^{-3}$. Это значение γ_w хорошо согласуется с нашими предыдущими результатами для SiC [5,6]. Так при стандартной геометрии эксперимента с евромоделью при давлениях 75 и 125 гПа и $T_w = 1770$ К было получено значение $\gamma_w = 3 \cdot 10^{-3}$ [5].

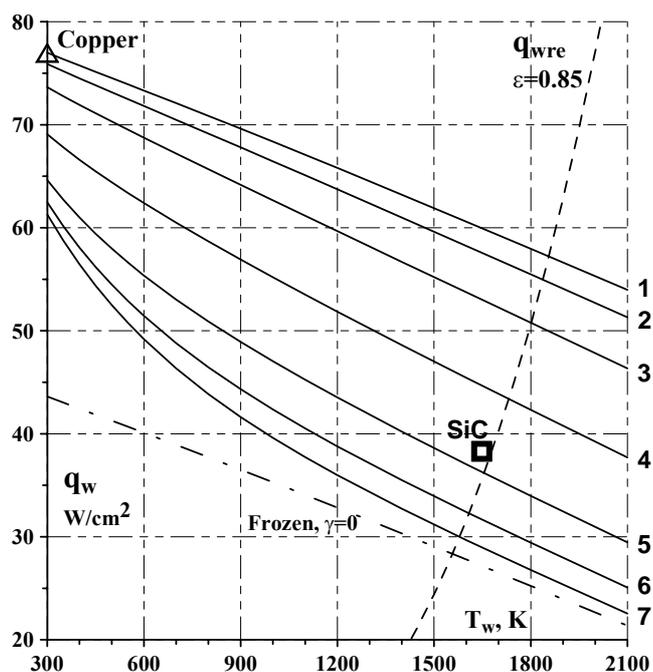


Рис. 6. Карта тепловых потоков для режима 1 на воздухе при $L=40$ мм, $p=170$ гПа, $V_s=158$ м/с, $h_e=7.7$ МДж/кг. Кривые 1-7: $\gamma_w=1; 0.1; 0.032; 0.01; 0.0032; 0.001; 0$

Во втором режиме обтекания модели потоком диссоциированного воздуха поверхность SiC проявила совсем другие каталитические свойства (рис. 7). Эта поверхность оказалась близка к абсолютно каталитической при $p=540$ гПа и $T_w=2110$ К ($\gamma_w=6 \cdot 10^{-2}$), хотя наши предыдущие результаты показали убывание γ_w с ростом давления при постоянной температуре [5,6]. Возможно, в данном случае имеет место переход от пассивного окисления поверхности SiC с образованием пленки SiO_2 в первом режиме к активному окислению поверхности SiC во втором режиме. Это означает,

что фактически в этих двух режимах мы имеем дело с разными поверхностями одного и того же образца.

В потоке частично диссоциированного азота при $p=170$ гПа, $V_S=116$ м/с, $h_e=9.2$ МДж/кг температура поверхности образца SiC $T_w=1680$ К (рис. 8) была близка к температуре поверхности SiC в режиме 1 на воздухе.

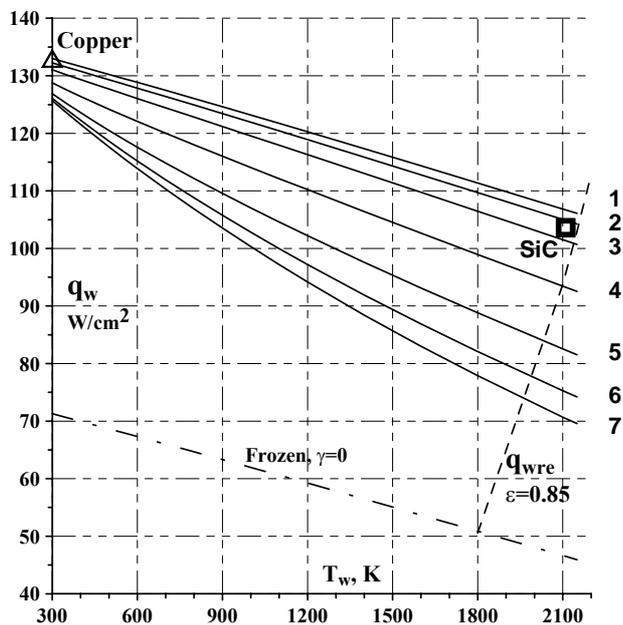


Рис. 7. Карта тепловых потоков для режима 2 на воздухе при $L=40$ мм, $p=540$ гПа, $V_S=75$ м/с, $h_e=12$ МДж/кг. Кривые 1-7: $\gamma_w=1; 0.1; 0.032; 0.01; 0.0032; 0.001; 0$

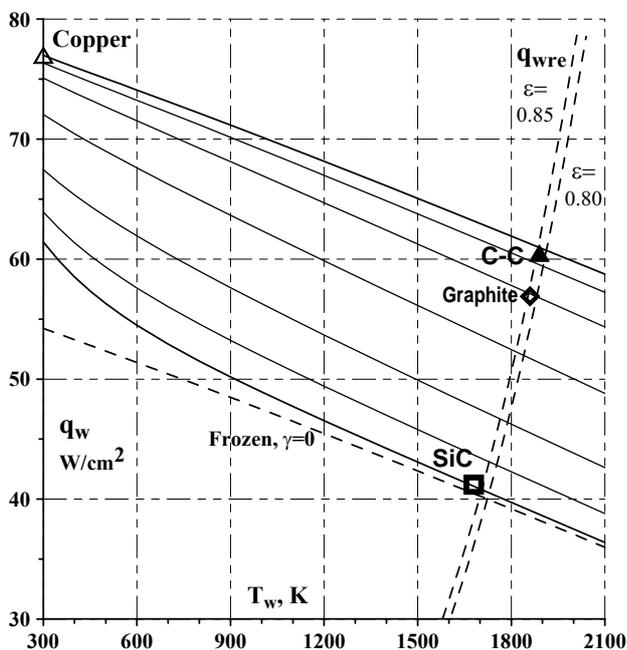


Рис. 8. Карта тепловых потоков для режима на азоте при $L=40$ мм, $p=170$ гПа, $V_S=116$ м/с, $h_e=9.2$ МДж/кг. Обозначения кривых см. на рис. 7

Как видно из рис. 8, поверхность SiC практически некаталитична по отношению к рекомбинации атомов N. С другой стороны, графит В-1 и материал углерод-углерод показали высокую каталитическую активность в частично диссоциированном азоте: для графита

та В-1 $\gamma_{wN}=0.03$ при $T_w=1860$ К и для углерод-углерода (почти полностью каталитического) $\gamma_{wN}=0.3$ при $T_w=1890$ К. Эти данные удовлетворительно согласуются с данными [13] по каталитической рекомбинации атомарного азота на графите и пирографите.

Фактические значения γ_{wN} , полученные в потоках чистого азота для SiC, графита В-1 и углерод-углерода важны для методических целей, но не для использования в расчетах обтекания тел при входе в атмосферу Земли. Как показано в [14], поверхность SiC после воздействия на нее диссоциированным воздухом другая, чем после воздействия диссоциированным азотом.

8. ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ НА УСЛОВИЯ ВХОДА В АТМОСФЕРУ

Параметры обтекания модели дозвуковыми потоками диссоциированного воздуха в режимах 1 и 2 могут быть пересчитаны на соответствующие условные значения скорости входа в атмосферу Земли и плотность по простым формулам теории локального моделирования теплообмена [6-8]:

$$h_{2\infty} = \frac{1}{2} V_{1\infty}^2, \quad p_{2\infty} = (1 - k_1) \rho_{1\infty} V_{1\infty}^2$$

Соответственно для режима 1 получаем значения скорости входа $V_{\infty 1}=3920$ м/с, плотности $\rho_{\infty 1}=1.2 \times 10^{-3}$ кг/м³ и высоты $Z_1=48.8$ км и для режима 2: $V_{\infty 2}=4900$ м/с, $\rho_{\infty 2}=2.25 \times 10^{-3}$ кг/м³ и $Z_2=44$ км. Первый набор параметров соответственно ниже параметров траектории аппарата «EXPERT» в точке 1: $V_{\infty 1}=5000$ м/с и $Z_1=52.6$ км [9]. Рассчитанный тепловой поток к абсолютно каталитической равновесно-радиационной стенке равен 57 Вт/см² (рис.6). Это значение меньше, чем рассчитанное значение теплового потока для такой стенки в точке траектории 1 на 26%: $q_{w1}=77$ Вт/см² [9].

Второй набор условных траекторных параметров, рассчитанных для экспериментального режима 2, близок к траекторной точке 2 аппарата «EXPERT» в отношении скорости и высоты полета: $V_{\infty 2}=4830$ м/с и $Z_2=43$ км. Вычисленное значение теплового потока к абсолютно каталитической радиационно-равновесной стенке составляет 106 Вт/см² (рис. 7), что на 20% ниже соответствующего теплового потока в критической точке аппарата «EXPERT» в траекторной точке 2: $q_{w2}=133$ Вт/см² [9].

Необходимо заметить, что эффект перехода от пассивного окисления в режиме 1 к активному окислению в режиме 2 обнаружен в экспериментах на плазматроне ВГУ-4 продолжительностью в несколько минут каждый. В процессе входа в атмосферу условия термохимического воздействия на поверхность аппарата от точки траектории 1 до точки 2 изменятся в течение нескольких секунд. Представляется проблематичным зарегистрировать это изменение в термохимии поверхности во время полета.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение нового водоохлаждаемого секционированного канала с конической и цилиндрической частями с диаметром выходного сечения 40 мм существенно расширило возможности плазматрона ВГУ-4 в области относительно низких энтальпий и высоких давлений. Получены дозвуковые потоки диссоцииро-

ванного воздуха и азота высокого аэротермодинамического качества в диапазоне энтальпий 7.7÷12 МДж/кг и давлений 170÷540 гПа, выполнена их экспериментальная и расчетная диагностика.

Все три режима обтекания модели дозвуковыми потоками диссоциированного воздуха и азота, исследованные в данной работе, оказались весьма интересными в методическом и прикладном аспектах.

В режиме 1 обтекания модели диссоциированным воздухом рекомбинация атомарного кислорода играет доминирующую роль в катализе на поверхности материала SiC, так что из сравнения экспериментальных и расчетных значений тепловых потоков (рис.6) определено значение коэффициента каталитической рекомбинации атомов O на этом материале: $\gamma_{\text{WO}}=4 \times 10^{-3}$ при $T_{\text{W}}=1650$ К и $p=170$ гПа. В режиме 2 в потоке диссоциированного воздуха поверхность SiC проявилась как почти абсолютно каталитическая при $T_{\text{W}}=2110$ К и $p=540$ гПа. Это указывает на смену режима окисления SiC от пассивного к активному при переходе от режима испытаний 1 к режиму 2.

При дозвуковом обтекании поверхности модели диссоциированным азотом ($p=170$ гПа) обнаружено, что поверхность SiC практически некаталитическая ($T_{\text{W}}=1680$ К), а поверхность материала углерод-углерод близка к абсолютно каталитической ($T_{\text{W}}=1890$ К) по отношению к рекомбинации атомов N. Таким образом в экспериментах с дозвуковыми потоками диссоциированного азота эти материалы могут использоваться в качестве стандартных с предельными каталитическими свойствами.

Реализованные на плазмотроне ВГУ-4 режимы 1 и 2 обтекания евромодели дозвуковыми потоками диссоциированного воздуха могут рассматриваться как первое приближение к условиям моделирования нагрева критической точки аппарата «EXPERT» в точках траектории 1 и 2. Для повышения точности моделирования теплообмена в точке траектории 1 нужно соответственно повысить энерговклад в плазму и ее энтальпию в режиме 1. Повысить точность моделирования теплообмена для точки траектории 2 можно за счет использования модели с меньшим радиусом $R_m=15$ мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (3151), Российского фонда фундаментальных исследований (08-01-00447-а), программы фундаментальных исследований Президиума РАН (проект П09) и гранта «Научные Школы» - НШ-835.2006.1.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

G — расход воздуха в разрядном канале плазмотрона, г/с;

h — энтальпия, МДж/кг;

L — расстояние от выходного сечения сопла до модели, мм;

N_{ap} — мощность ВЧ-генератора по анодному питанию, кВт;

N_{pl} — мощность, вложенная в плазму, кВт;

P — давление в барокамере, гПа;

T_{∞} — температура воздуха в барокамере, К;

T_w — температура поверхности модели, К;

R_m — радиус модели, мм;

R_w — радиус носового затупления тела;

T — температура газа, К;

V — скорость потока, м/с;

Z — высота полета, км;

ρ_{∞} — плотность атмосферы, кг/м³;

γ_{WO} — коэффициент каталитической рекомбинации атомов O на поверхности;

γ_{WN} — коэффициент каталитической рекомбинации атомов N на поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kolesnikov A.. The Aerothermodynamic Simulation in Sub- and Supersonic High-Enthalpy Jets: Experiment and Theory. In Proc. 2nd European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles. ESA Publication Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-367, 1995. pp. 583-590.
2. Vasil'evskii S.A., Kolesnikov A.F., and Yakushin M.I. Mathematical Models for Plasma and Gas Flows in Induction Plasmatrons. In: Molecular Physics and Hypersonic Flows (Ed. M. Capitelli), NATO ASI Series, Kluwer. V. 482, 1996. pp. 495-504.
3. Kolesnikov A., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A. and Yakushin M.I. Study of Quartz Surface Catalyticity in Dissociated Carbon Dioxide Subsonic Flows // Journal of Spacecraft and Rockets. V. 37. No. 5. 2000. pp. 573-579.
4. Kolesnikov A., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A. Predicting Catalyticity of Si-Based Coating and Stagnation Point Heat Transfer in High-Enthalpy CO₂ Subsonic Flows for the Mars Entry Conditions. In: Proc. Int. Workshop 'Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science'. (Ed. A. Wilson), ESA Publication Division, European Space Agency, Noordwijk, The Netherlands. ESA SP-544, 2004. pp. 77-83.
5. Kolesnikov A., Gordeev A., Vasil'evskii S., Vérant J.L. Technical Approach and validation of Reentry Heating Simulation for the Pre-X and EXPERT Vehicles Using the IPG-4 Plasmatron. In Proc. EUCASS2005 (CD-ROM). 2005. Moscow, Russia.
6. Kolesnikov A., Gordeev A., Vasil'evskii S., Vérant J.L. Predicting Catalytic Properties of SiC Material for the Pre-X Vehicle Re-Entry Conditions. In Proc. 2nd EUCASS European Conference for Aero-Space Sciences (CD-ROM). 2007. Brussels, Belgium.
7. Колесников А.Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // МЖГ. № 1. 1993. С. 172-180.
8. Kolesnikov A.F. Extrapolation from High Enthalpy Tests to Flight Based on the Concept of the Local Heat Transfer Simulation. In: Measurement Techniques for High Enthalpy and Plasma Flows. RTO-EN-8. 2000. 8B-1 - 8B-14.
9. Kolesnikov A.F. The Concept of Local Simulation for Stagnation Point Heat Transfer in Hypersonic Flows: Applications and Validation. 2000. AIAA Paper 2000-2515.
10. Muiylaert J., Caporicci M. Preparing for Reentry with EXPERT: The ESA in Flight ATD Research Programme. In Proc. EUCASS2005 (CD-ROM). 2005. Moscow, Russia.
11. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное моделирование течений равновесной индукционной плазмы в цилиндрическом канале плазмотрона // МЖГ. № 5. 2000. С. 164-173.
12. Patankar S.V. and Spalding D.B., *Heat and Mass Transfer in Boundary Layers*, Intertext Books, London, 1970.
13. Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Якушин М.И. Определение эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов в условиях влияния на тепловой поток газофазных реакций // ТВТ. Т. 29. № 3. 1991. С. 521-529.
14. Gerasimova O., Kolesnikov A., Borisov S., Gordeev A. Surface Structure Degradation of Si-Based Materials Exposed to Dissociated Air and Nitrogen Flows. In: Proc. 25th Int. Symposium on Rarefied Gas Dynamics. (Eds. M.S. Ivanov & A.K. Rebrov), Saint-Petersburg, Russia, 21-28 July 2006. pp. 661-665.