

## ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НА УСТАНОВКЕ VAT-104

И.В. Егоров, Б.Е. Жестков, В.В. Шведченко

*Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского,  
Московская область, г. Жуковский, 140180, ул. Жуковского, 1*

### Аннотация

На основе нестационарных двумерных уравнений Навье – Стокса смоделировано течение азота в тракте высокотемпературной установки VAT-104 ЦАГИ и проведены расчеты в широком диапазоне изменения давления (1÷40 кПа) и температуры (5500÷8000 К) торможения. Для сверхзвуковой струи на выходе из сопла выполнены параметрические численные исследования неравновесного теплообмена при различных значениях каталитической активности поверхности. Для каждого режима определен наклон кривой  $\alpha = dT_w/dK_w$  в зависимости температуры поверхности от значения константы скорости гетерогенной рекомбинации. Определены значения каталитической активности C-SiC материала при температурах поверхности  $T_w = 1500\div 1950$  К.

### THE RELATIVE METHOD OF CATALYTICITY EVALUATION AT HIGH TEMPERATURES IN VAT-104 FACILITY

I.V. Yegorov, B.E. Zhestkov, V.V. Shvedchenko

*Central Aerohydrodynamic Institute,  
Russia, Zhykovsky, Moscow region 140180*

The nitrogen flow in the high-temperature VAT-104 facility canal and flow over the circular cylinder were simulated using full non-stationary 2-d Navier – Stokes equations combined with dissociation-recombination and exchange reactions. The parametrical calculations in the wide range of stagnation temperature, pressure and catalyticity values were performed. The modified method of catalyticity evaluation was proposed. The catalyticity of C-SiC samples is defined using the developed methodology.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При исследовании новых теплозащитных материалов необходимо определить константу скорости гетерогенной рекомбинации атомов азота и кислорода на поверхности изучаемого материала. Использование материалов с низкой каталитической активностью позволяет избежать рекомбинации атомов на поверхности аппарата, сопровождающейся значительным увеличением теплового потока. Благодаря этому удается существенно снизить тепловой поток и температуру рабочей поверхности аппарата. Исследованиям каталитических свойств материалов посвящено большое количество работ [1–10], однако, имеющиеся данные все еще недостаточны, особенно для новых материалов. В данной работе определяется константа скорости гетерогенной рекомбинации атомов азота с тем, чтобы разделить эффекты, связанные с рекомбинацией атомов азота и кислорода.

В имеющихся работах константа скорости гетерогенной рекомбинации  $K_w$  определяется по данным параметрического численного моделирования обтекания и теплообмена модели с использованием в качестве основных параметров значений давления и температуры торможения, диаметра модели, коэффициента черноты, как значение, при котором измеренный тепловой поток (температура теплоизолированной модели) совпадает с расчетным значением. В целом ряде исследований каталитические свойства материала оп-

ределяются путем сопоставления теплового потока к изучаемому материалу и эталонному образцу, в частности, при испытаниях комбинированных моделей, где свойства образца исследуемого материала в одном эксперименте сравниваются со свойствами образца эталонного материала. В этих случаях целесообразно использовать предлагаемую методику. По этой методике с помощью параметрического численного моделирования обтекания и теплообмена модели рассчитывается производная  $dT_w/dK_w$ . Значение  $K_w$  исследуемого образца определяется через значение  $K_{w\text{эт}}$  для эталонного образца и измеренную в эксперименте разность температур исследуемого и эталонного образцов.

В настоящее время при исследовании каталитических свойств материалов используется численное моделирование течения в тракте установки, обтекания и теплообмена модели [11–24]. Исследованию этих вопросов применительно к установке VAT-104 посвящены работы [23, 24]. Данная статья является продолжением этих работ.

## 2. ТЕЧЕНИЕ В ТРАКТЕ УСТАНОВКИ VAT-104

Установка периодического действия VAT-104 ЦАГИ с высокочастотным индукционным подогревателем используется для исследования неравновесного теплообмена, испытания высокотемпературных материалов и определения их термохимической устойчивости, каталитических свойств. VAT-104 сертифицирована в составе испытательного центра ЦАГИ «Аэро-

термодинамика». Основные элементы установки: высокочастотный индукционный подогреватель, сверхзвуковое сопло (коническое или прямоугольное), рабочая камера, где установлены державка с исследуемым образцом, теплообменник, откачивающая вакуумная система и система сбора информации. В качестве рабочего вещества служат различные газы: азот, воздух, аргон. Температура в подогревателе  $T_0 = 6000 \div 8000$  К, а давление  $p_0$  до 0.5 атмосферы.

В работе численно решались уравнения Навье–Стокса, описывающие двумерные течения химически неравновесной смеси газов. В пакет программ, разработанный в ЦАГИ, заложена пятикомпонентная модель газовой среды ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $NO$ ,  $O$ ,  $N$ ) с учетом реакций диссоциации, рекомбинации и обменных реакций [23, 24]. Процессы излучения, ионизации и возбуждения электронных уровней не учитывались. Принималось, что колебательные степени свободы находятся в равновесии с поступательными, а для учета энергии колебаний использовалась модель гармонического осциллятора.

Нестационарные уравнения Навье–Стокса для неравновесной смеси, состоящей из 99% азота и 1% кислорода, решались методом конечного объема и установления по времени [23,24]. Поскольку на выходе из сопла Лавала поток в целом сверхзвуковой, это позволяет проводить расчет поля течения поэтапно: на первом этапе определяется поле течения в сопле Лавала, на втором в рабочей части. Рассчитывалось течение в цилиндрической форкамере, коническом сверхзвуковом сопле и обтекание кругового цилиндра диаметром  $D = 0.01 \div 0.10$  м, расположенного по оси потока на расстоянии 0.10 м от среза сопла (рис. 1).

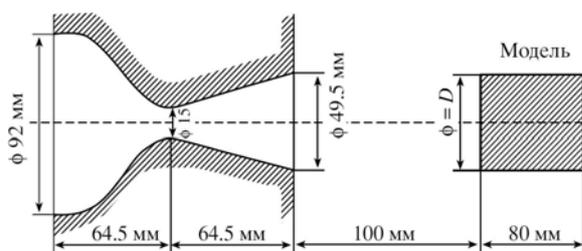


Рис. 1. Схема сопла Лавала и рабочей части с установленным в ней круговым цилиндром  $D = 0.05$  м

Как показали расчеты [24] для условий на входе недорасширенного сопла  $p_0 = 1 \div 40$  кПа,  $T_0 = 5500 \div 8000$  К в рабочей камере реализуется сверхзвуковая струя со следующими параметрами (в зависимости от  $x$ -координаты):  $M = 4 \div 7$ ,  $Re = 50 \div 500$ ,  $Kn = 0.3 \div 0.02$ , где за единицу длины принято  $L = 0.1$  м.

При высоких давлениях реализуется режим близкий к режиму сплошной среды, а при низких переходной, где необходимо учитывать эффекты разреженности.

Сетки расчетного эксперимента приведены на рис. 2. При расчете течения азота использовались следующие граничные условия. На входе сопла давление  $p_0$ , температура  $T_0$  и равновесное значение степени диссоциации. На стенке сопла условие прилипания, изотермичности ( $T_w = 293$  К) и заданное значение константы скорости гетерогенной рекомбинации ( $K_w = 10$  м/с). На

выходе из сопла использовались мягкие условия экстраполяции.

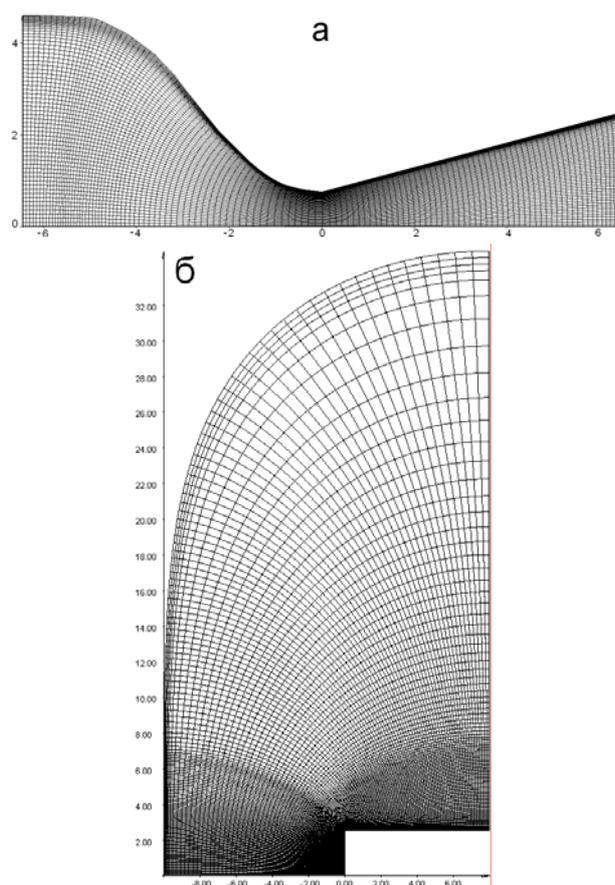


Рис. 2. Расчетные сетки при определении поля течения (а) в сопле и (б) в рабочей части для модели диаметром  $D = 0.05$  м

Значения параметров газа в выходном сечении сопла используется в качестве граничных условий при определении течения в рабочей части. На оси сопла использовались условия симметрии. На поверхности цилиндра ставились условие прилипания, баланса теплового и лучистого потока с коэффициентом черноты  $\varepsilon = 0.8$  и задавалось значение константы скорости гетерогенной рекомбинации  $K_w$  обтекаемой поверхности. На выходной границе использовались мягкие условия экстраполяции в случае вытекания газа или заданное значение статического давления  $p_{st}$ . В расчетах (также как и в [24]) заданное давление в рабочей камере составляло  $p_{st} = 0.13$  Па. Размер рабочей части выбирался достаточно большим, чтобы исключить влияние стенок рабочей камеры на течение около цилиндра диаметра  $D = 0.01 \div 0.1$  м на расстоянии 0.1 м от среза сопла. Ниже представлены результаты для цилиндра с диаметром  $D = 0.05$  м.

В целом распределения давления и температуры по оси потока в тракте установки (нормированные на значение на входе сопла) при изменения  $p_0$  и  $T_0$  мало изменяются (рис. 3). При малых давлениях, становятся существенными тепловые потери в сопле, и соответственно, распределение температуры на оси сопла для давления  $p_0 = 1.33 \div 5.33$  кПа заметно отличается от распределения при давлении  $p_0 = 8 \div 26.7$  кПа (рис. 3б).

Более значительно меняется степень диссоциации при изменении температуры и давления (рис. 4–6).

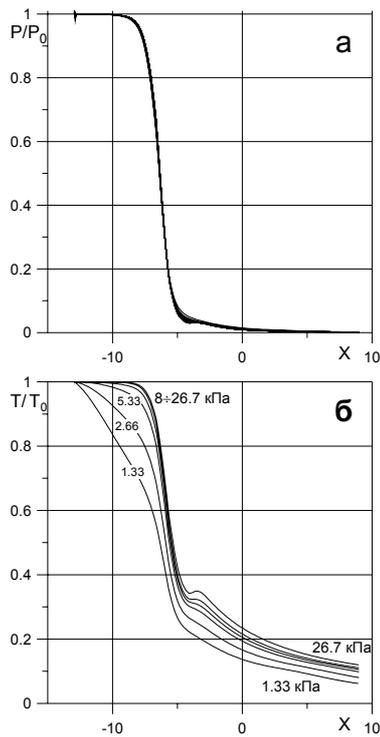


Рис. 3. Распределение давления  $p/p_0$  и температуры  $T/T_0$  по оси  $x$  в тракте установки при значениях температуры на входе сопла  $T_0 = 6500$  К и давления  $p_0 = 1.33, 2.66, 5.33, 8, 13.3, 26.6$  кПа

ления в сопле степень диссоциации падает. При малых давлениях происходит существенное падение концентрации атомарного азота в сопле, а в рабочей камере реализуется течение с практически замороженной концентрацией атомарного азота (рис. 6).

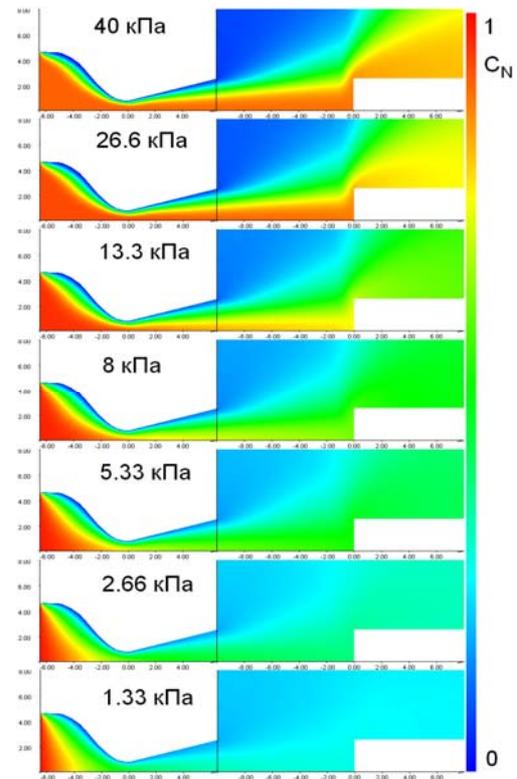


Рис. 5. Поле концентрации атомов азота в тракте установки при температуре на входе сопла  $T_0 = 8000$  К и давления  $p_0 = 1.33 \div 40$  кПа

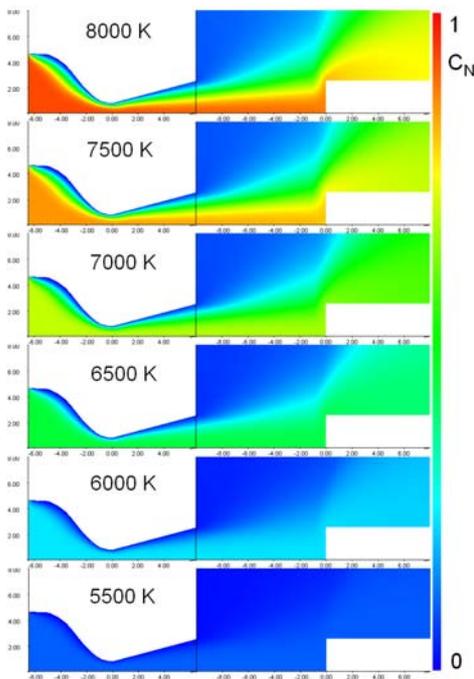


Рис. 4. Поле концентрации атомов азота в тракте установки при давлении на входе сопла  $p_0 = 26.6$  кПа и температуре  $T_0 = 5500 \div 8000$  К

При высоких значениях давления в сопле  $p_0 = 26.7$  кПа ( $T_0 = 5500 \div 8000$  К) реализуется течение с практически замороженной концентрацией атомарного азота в сопле и струе. При уменьшении температуры и дав-

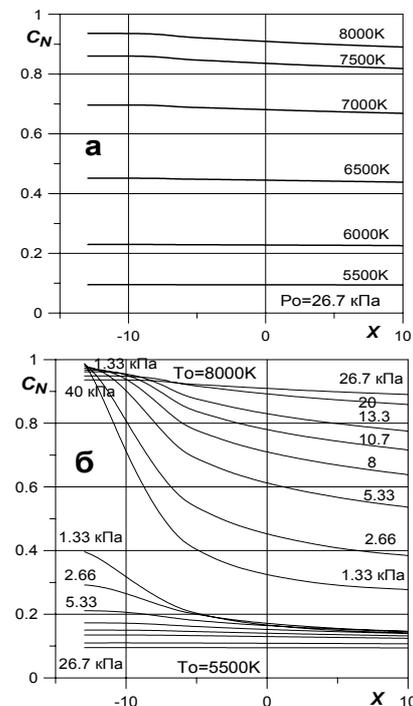


Рис. 6. Распределение концентрации атомов азота по оси  $x$  (а) при давлении на входе сопла  $p_0 = 26.7$  кПа и температуре  $T_0 = 5500 \div 8000$ ; (б) при температуре на входе сопла  $T_0 = 5500$  К и  $8000$  К и давления  $p_0 = 1.33 \div 26.7$  кПа

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНОГО ТЕПЛООБМЕНА

В целом, распределения давления и температуры в ударном слое (нормированные на значения на входе сопла) при изменении  $p_0$  и  $T_0$  мало изменяются (рис. 7).

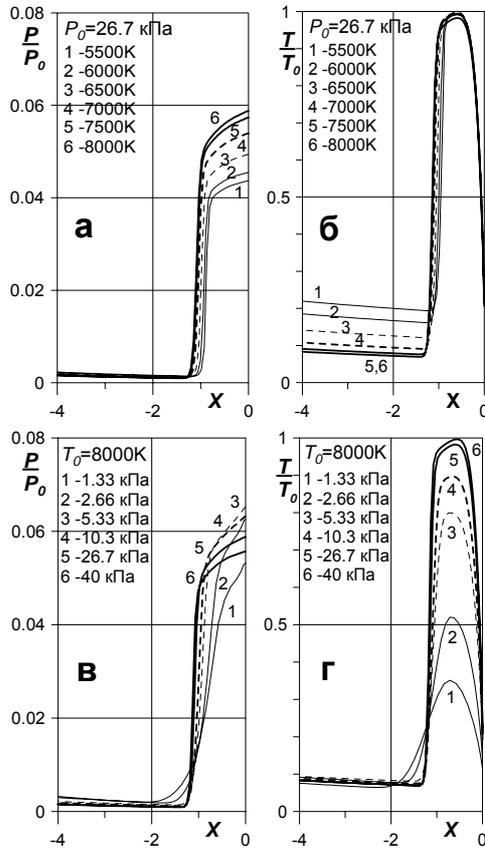


Рис. 7. Распределение по оси  $x$  давления  $p/p_0$  и температуры  $T/T_0$  в ударном слое: (а,б) при давлении на входе сопла  $p_0 = 26.7$  кПа и температуре  $T_0 = 5500 \div 8000$  К; (в, г) при температуре на входе сопла  $T_0 = 8000$  К и давлении  $p_0 = 1.33 \div 40$  кПа

Отметим, что при низких  $T_0$  немного уменьшается давление у модели. При малых  $p_0$  заметно уменьшается температура торможения у модели (тепловые потери в сопле) и заметно размазывается фронт ударной волны из-за уменьшения числа Рейнольдса. Возможно, это также вызвано влиянием эффектов разреженности на решения уравнений Навье – Стокса.

Из рис. 8–9 ( $T_0 = 8000$ ,  $p_0 = 26.7$  кПа) видно, что рекомбинация атомов азота на поверхности практически не влияет на газодинамическое течение у модели. При изменении каталитических свойств поверхности  $K_w = 0 \div 1000$  м/с концентрация атомов азота существенно изменяется только в пограничном слое, а поле температуры в ударном слое практически неизменно.

При изменении  $K_w$  от 0 до 1000 м/с температурный фактор  $T_w/T_0$  меняется в пределах от 0.2 до 0.3. Абсолютное изменение температуры поверхности при различных давлениях достаточно значительно 400–600 К, что проявляется на зависимостях от давления и от каталитических свойств в широком диапазоне (рис. 10).

При уменьшении температуры  $T_0$  тепловой эффект от рекомбинации на поверхности атомов азота снижает-

ся (пунктир для  $T_0 = 5500$  К на рис. 10) из-за падения степени диссоциации. В дальнейшем для определения константы скорости гетерогенной рекомбинации исследуемых материалов проводились расчеты в диапазоне изменения каталитической активности  $K_w = 0 \div 10$  м/с и определялись наклоны кривых  $dT_w/dK_w$  при различных значениях давления  $p_0 = 1.33 \div 40$  кПа.

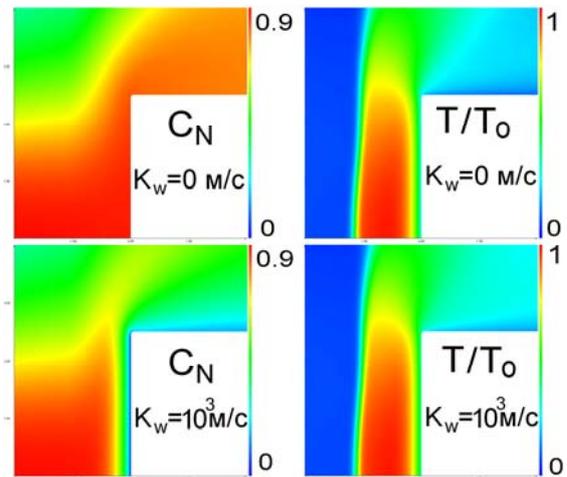


Рис. 8. Распределение концентрации  $C_N$  (а) и температуры  $T/T_0$  (б) в ударном слое на оси струи при изменении каталитической активности поверхности  $K_w = 0 \div 1000$  м/с ( $T_0 = 8000$ ,  $p_0 = 26.7$  кПа)

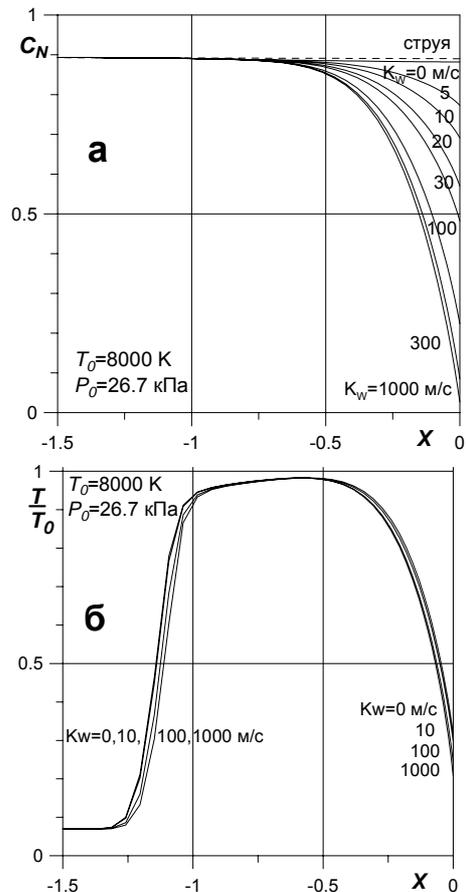


Рис. 9. Распределение концентрации  $C_N$  (а) и температуры  $T/T_0$  (б) в ударном слое на оси струи при давлении на входе сопла  $p_0 = 26.7$  кПа и температуре  $T_0 = 8000$  К при изменении каталитических свойств поверхности  $K_w = 0 \div 1000$  м/с

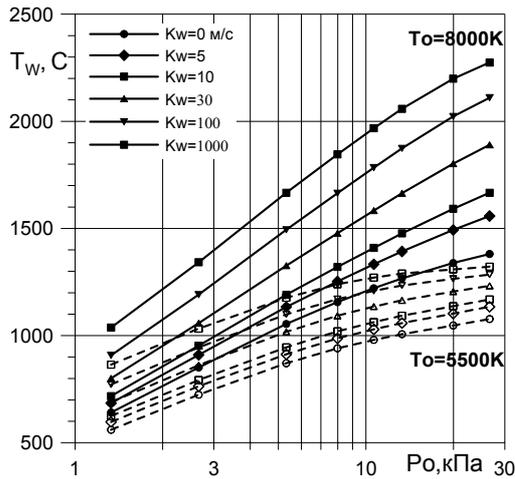


Рис. 10. Зависимость температуры поверхности  $T_w$  (а) от давления в сопле  $p_0$  при значениях  $K_w = 0 \div 1000$  м/с ( $T_0 = 8000$  К – сплошная,  $T_0 = 5500$  К – пунктир)

В численных расчетах исследовано влияние вакуума  $p_{st}$  на течение около модели для  $D=0.05$  м.

При соотношении  $p_{st}/p_0 < 10^{-3}$  влияние уровня вакуума отсутствует.

При  $p_{st}/p_0 = 10^{-3} \div 3 \times 10^{-3}$  заметно влияние глубины вакуума на внешние края поля течения у модели, а влияние на температуру поверхности модели отсутствует.

При  $p_{st}/p_0 = 3 \times 10^{-3} \div 7 \times 10^{-3}$  происходит значительное влияние  $p_{st}$  на поле течения у модели. При этом изменения температуры поверхности модели еще незначительны.

При  $p_{st}/p_0 \approx 10^{-2}$  происходит разрушение обтекания сверхзвуковой струей и наблюдается значительное изменение температуры поверхности. Отметим, что в параметрических расчетах принималось  $p_{st}/p_0 < 10^{-4}$  ( $p_{st} = 0.13$  Па).

При сравнении с экспериментом увеличение  $p_{st}$  от 4 Па до 40 Па (при  $p_0$  от 4 кПа до 40 кПа) не влияет на значение температуры поверхности.

#### 4. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

В работе [24] показано, что расчеты распределения давления в струе хорошо согласуются с экспериментом (рис. 11).

Для температуры поверхности в случае материалов с низкой каталитической активностью согласие значительно хуже (рис. 12). Поэтому для определения каталитической активности поверхности перспективным представляется описанный ниже подход. Были проведены параметрические исследования для температуры  $T_0 = 5500 \div 8000$  К.

Для примера, на рис.13 приведены параметрические зависимости температуры поверхности от ее каталитических свойств в широком диапазоне  $K_w = 0 \div 1000$  м/с и в узком диапазоне  $K_w = 0 \div 10$  м/с. Из этих зависимостей определялся наклон  $dT_w/dK_w$ .

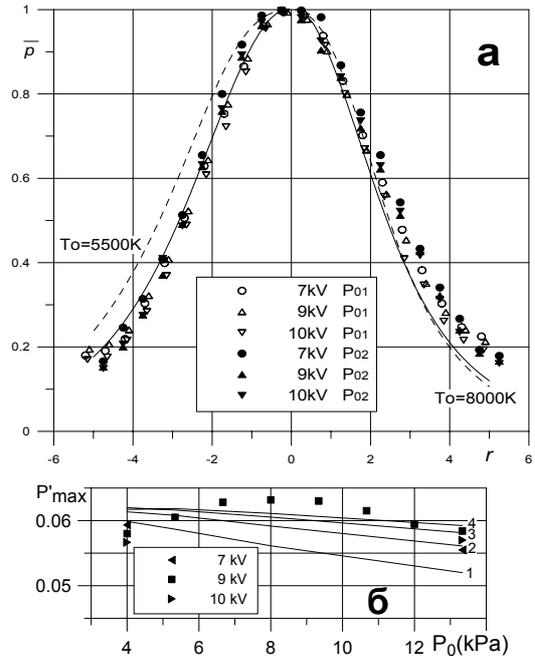


Рис. 11. Сравнение расчетных (линии) и экспериментальных (маркеры) данных по профилю относительного давления (а) и величине полного давления за прямым скачком уплотнения (б) в сечении  $x=0.1$  м. Расчет: (а) сплошная линия  $P_{01} = 4$  кПа, пунктирная линия  $P_{02} = 13.3$  кПа, слева –  $T_0 = 5500$  К, справа –  $T_0 = 8000$  К, (б) линии 1,2,3,4 –  $T_0 = 6500$  К, 7000 К, 7500 К, 8000 К соответственно

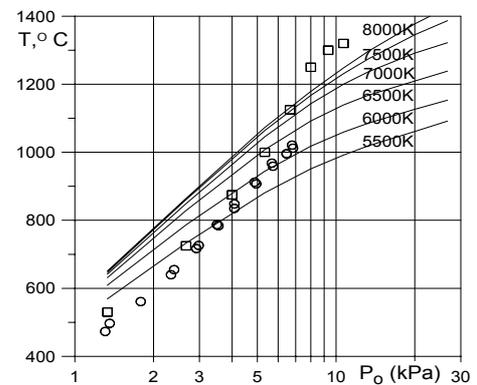


Рис. 12. Сопоставление расчетных (линии) и экспериментальных (маркеры) значений радиационно-равновесной температуры в передней критической точке цилиндра диаметром  $D=0.05$  м с низкой каталитической активностью обтекаемой поверхности  $K_w \sim 1$  м/с. Кривые соответствуют значениям  $T_0 = 5500 \div 8000$  К для  $K_w = 1$  м/с

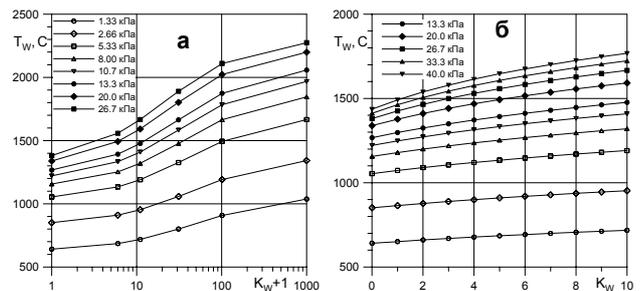


Рис. 13. Зависимость температуры поверхности  $T_w$  от значений  $K_w$  при давлениях  $p_0 = 1.33 \div 40$  кПа ( $T_0 = 8000$  К) в широком (а) и узком (б) диапазоне значений  $K_w$ .

На рис. 14 приведена зависимость наклона  $dT_w/dK_w$  от давления для разных значений температуры  $T_0$ . Зависимости для  $T_0 = 8000$  К и  $T_0 = 7500$  К совпали, а кривая для  $T_0 = 7000$  К близка к ним. Величина  $dT_w/dK_w$  определяет изменение температуры при изменении каталитической активности поверхности на 1 м/с.

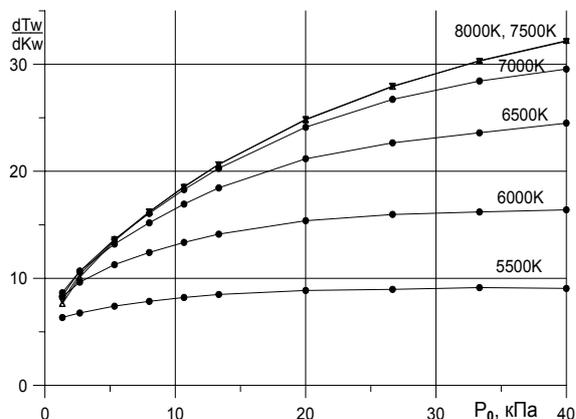


Рис. 14. Зависимость наклона  $dT_w/dK_w$  (К·с/м) от давления на входе сопла  $p_0$  для значений температуры  $T_0 = 5500 \div 8000$  К

На рис. 15 приведены соответствующие зависимости концентрации атомов азота на модели при  $K_w = 0$  (сплошные линии  $p_0$  до 40 кПа).

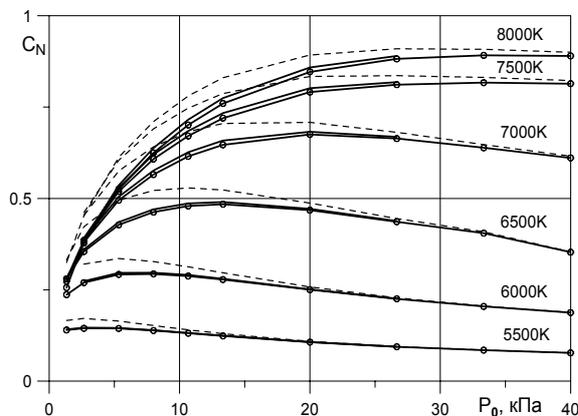


Рис. 15. Зависимость концентрации атомов азота  $C_N$  от давления на входе сопла  $p_0$  для значений температуры  $T_0 = 5500 \div 8000$  К. Сплошные – у поверхности (до 40 кПа) и в свободной струе (до 26.7 кПа). Пунктир – на срезе сопла

Для сравнения сплошными ( $p_0$  до 26.7 кПа) показаны концентрации атомов азота в свободной струе. Пунктиром представлено значение  $C_N$  на срезе сопла. Видно незначительное падение  $C_N$  в ударном слое и небольшое падение концентрации атомов азота от сопла до модели.

На рис. 16–17 приведены результаты эксперимента.

На рис. 16 по  $x$ -координате нанесена температура эталонного, а по  $y$ -координате исследуемого образца. Разница температуры поверхности этих образцов составляет  $\Delta T_w \approx 50 \div 100$  °С. Значение константы скорости гетерогенной рекомбинации для исследуемого образца определяется через значение константы  $K_{ws}$  эталонного образца и измеренную в эксперименте раз-

ницу температур поверхности  $\Delta T_w$  исследуемого и эталонного образцов  $K_w = K_{ws} + \Delta T_w/\alpha$ , где  $\alpha = dT_w/dK_w$  результат численных расчетов.

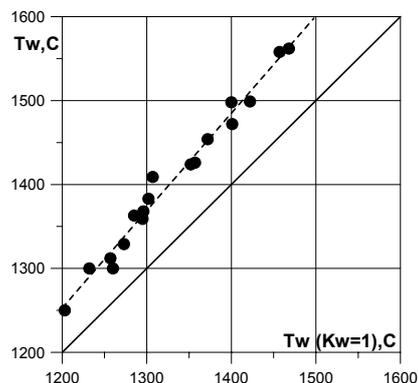


Рис. 16. Результаты испытаний материала C-SiC и ЭВЧ4М-1У3 ( $K_w \approx 1$  м/с). По  $x$ -координате нанесена температура эталонного ( $K_w \approx 1$  м/с), а по  $y$ -координате исследуемого образца

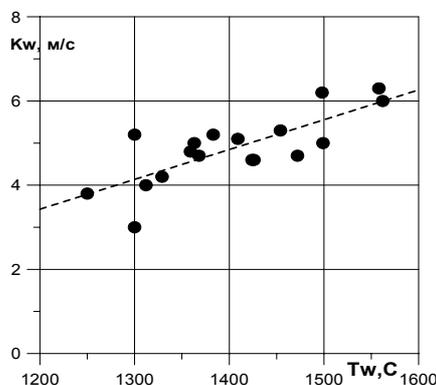


Рис. 17. Зависимость значения константы скорости гетерогенной рекомбинации  $K_w$  материала C-SiC от температуры поверхности  $T_w$

Полученные результаты по определению каталитической активности C-SiC материала согласуются с ранее полученными данными по каталитическим свойствам подобного материала [2].

Погрешности определения каталитической активности материала связаны с неопределенностью температуры торможения, коэффициента черноты поверхности, погрешностями измерения температуры поверхности и препарирования модели. Тем не менее, рассматриваемая методика основана на относительных измерениях и дает неплохие оценки для теплового эффекта при увеличении каталитической активности поверхности. В частности, для режимов установки ВАТ-104 ЦАГИ с  $p_0 = 6.6 \div 33.2$  кПа при изменении каталитической активности поверхности на  $\Delta K_w = 1$  м/с изменение температуры поверхности теплоизолированного цилиндра  $D = 0.05$  м на расстоянии 0.1 м от среза сопла составляет  $\Delta T_w \approx 15 \div 30$  °С.

Из этих результатов следует интересное предложение. Если есть два образца с разной известной каталитической активностью, то это можно использовать для определения наклона  $\alpha = dT_w/dK_w$  и таким образом определять каталитическую активность неизвестного образца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе нестационарных двумерных уравнений Навье-Стокса смоделировано течение диссоциирующего азота в тракте установки ВАТ-104 ЦАГИ. Проведены параметрические численные исследования теплообмена на торце цилиндра при различных значениях каталитической активности поверхности. Для каждого режима определен наклон кривой в зависимости температуры поверхности от значения константы скорости гетерогенной рекомбинации. Предложен метод определения каталитической активности материалов. С использованием этого метода определены значения каталитической активности C-SiC материала при температурах поверхности  $T_w = 1500 \div 1950$  К.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 11-01-00882-а и 11-08-01099-а).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $p$  — давление, Па = Н/м<sup>2</sup>;  
 $T$  — температура, К;  
 $K_w$  — константа скорости гетерогенной рекомбинации, м/с;  
 $C_N$  — безразмерная массовая концентрация атомов азота;  
 $M$  — число Маха;  
 $Re$  — число Рейнольдса;  
 $Kp$  — число Кнудсена;  
 $D$  — диаметр цилиндра, м;

### Индексы:

- $0$  — значение на входе сопла;  
 $w$  — значение на поверхности;

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Колесников А.Ф., Якушин М.И. Об определении эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов по тепловым потокам к поверхности, обтекаемой диссоциированным воздухом // *Мат. Моделирование*. 1989. Т.1. № 3. С. 44–60.
- Васильевский С.А., Колесников А.Ф., Якушин М.И. Определение эффективных вероятностей рекомбинации атомов в условиях влияния газофазных реакций на тепловой поток // *ТВТ*. 1993. № 3. С. 521–529.
- Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Якушин М.И. Влияние каталитической активности поверхности на неравновесный теплообмен в дозвуковой струе диссоциированного азота. // *Известия АН СССР, МЖГ*, 1985. №3. С. 166-172.
- Жестков Б.Е., Книвель А.Я. Экспериментальное исследование гетерогенной рекомбинации. // *Труды ЦАГИ*. 1981. Вып. 2111. С.215-227.
- Zhestkov B.E. and Knivel A.Ya. Some aspects of nonequilibrium free molecular nitrogen flow—metal surface interaction. // *Rarefied Gas Dynamics*. N. Y. Plenum Press. – 1985. - V. 1. – Pp. 687–694.
- Жестков Б.Е. Гетерогенная рекомбинация атомов азота и кислорода на кварце и металлах. // *Труды VIII Всесоюзной конференции по динамике разреженного газа*. М. изд. МАИ. 1987. С. 50-56.
- Андропова Ю.И., Жестков Б.Е. Макаров И.Г., Литвин А.С. Определение каталитических свойств материалов из тепловых измерений. // *Школа-семинар ЦАГИ “Аэротермодинамика воздушно-космических систем”*. Сборник докладов. изд. ЦАГИ. часть 1. С. 209–216, 1992.
- Shvedchenko V.V., Zhestkov B.E., Fischer W.P.P., Ebeling W.D. Methodology and Results of Catalycity and Plasma Erosion Tests on FEI Components. // *SAE Technical Paper* 941586.
- Zhestkov B.E., Ivanov D.V., Shvedchenko V.V., Jegorov I.V., Fischer W.P.P. and Antonenko J. Calculated and experimental flat and wavy surface temperature distributions. // *AIAA paper* 99-0733.
- Ковалев В.Л., Колесников А.Ф. Экспериментальное и теоретическое моделирование гетерогенного катализа в аэротермохимии. (Обзор.) // *Изв.РАН.МЖГ*. 2005. № 5. С. 3-31.
- Колесников А.Ф., Щелин В.С. Численный анализ точности моделирования гиперзвукового теплообмена в дозвуковых струях диссоциированного азота // *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1990. № 2. С. 135–143.
- Колесников А.Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // *Изв. РАН. МЖГ*. 1993. № 1. С. 172–180.
- Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное моделирование течений равновесной индукционной плазмы в цилиндрическом канале плазмотрона // *Изв. РАН. МЖГ*. 2000. № 5. С. 164–173.
- Kolesnikov A.F. The concept of local simulation for stagnation point heat transfer in hypersonic flows: applications and validation. // *AIAA* 2000–2515, June 2000.
- Афонина Н.Е., Васильевский С.А., Громов В.Г., Колесников А.Ф., Першин И.С., Сахаров В.И., Якушин М.И. Течение и теплообмен в недорасширенных струях воздуха, истекающих из звукового сопла плазмотрона. // *Изв. РАН. МЖГ*. 2002. № 5. С. 156-168.
- Сахаров В.И. Численное моделирование термически и химически неравновесных течений и теплообмена в недорасширенных струях индукционного плазмотрона // *Изв. РАН. МЖГ*. 2007. № 6. С. 157–168.
- Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Сахаров В.И. Течение и теплообмен в сверхзвуковых струях воздушной плазмы: эксперимент на ВЧ-плазмотроне и математическое моделирование. // *Всероссийская школа -семинар “Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем”*. АФМ-2007. Сб. Научных трудов. ИПМех РАН, М., 2007 г. С. 23–28.
- Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Новые режимы течения и теплообмена плазмы в высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4. // *Всероссийская школа-семинар “Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем”*. АФМ-2007. Сб. Научных трудов. ИПМех РАН, Москва, 2007. С. 130–136.
- Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Экспериментальное моделирование теплообмена в ВЧ-плазмотроне с удлиненным секционированным разрядным каналом. // *Изв. РАН. МЖГ*. 2010. № 3. С. 181–191.
- Afonina N.E., Gromov V.G., Sakharov V.I. HIGHTEMP technique of high temperature gas flows numerical simulations // *Proc. 5th Europ. Symp. on Aerothermodyn. Spase Vehicles*. Cologne, Germany. 2004. SP 563. Noordwijk: ESTEC. 2004. P. 323–328.
- Власов В.И. Теоретические исследования течения в разрядной и рабочей камерах ВЧ-плазмотрона // *Космонавтика и ракетостроение*. 2001. № 23. С. 18–26.
- Горшков А.Б. Численное моделирование обтекания моделей в струе высокочастотного плазмотрона // *Космонавтика и ракетостроение*. 2004. № 3(36). С. 54–61.
- Егоров И.В., Жестков Б.Е., Иванов Д.В. Моделирование химически неравновесных течений в соплах. // *Ученые записки ЦАГИ*. 1998. т.29, №1-2, с.95-111.
- Башкин В.А., Егоров И.В., Жестков Б.Е., Шведченко В.В. Численное исследование поля течения и теплообмена в тракте высокотемпературной аэродинамической установки. // *ТВТ*. 2008. т.46. №5. С.771–783.