

# Experimental and Numerical Simulation of the Heat Transfer of the UHTC Surface in Underexpanded Dissociated Nitrogen Jets

A.F. Kolesnikov<sup>1</sup>, V.I. Sakharov<sup>2</sup>, A.V. Chaplygin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia*

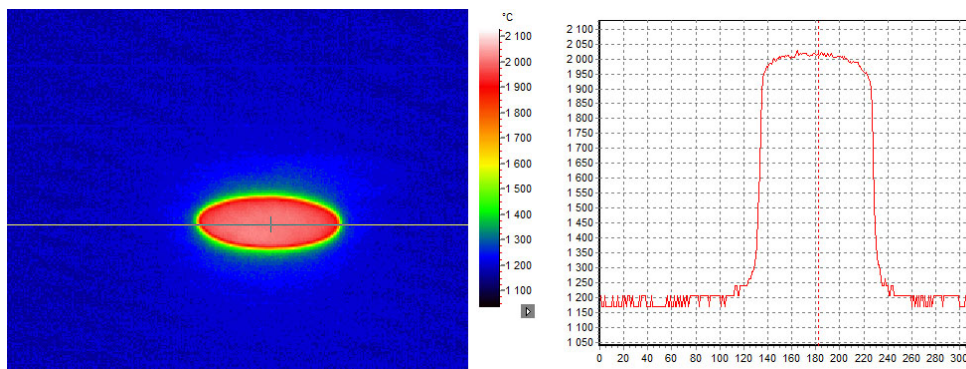
<sup>2</sup> *Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russia*

[koles@ipmnet.ru](mailto:koles@ipmnet.ru), [sakharov@imec.msu.ru](mailto:sakharov@imec.msu.ru)

## Abstract

Experiments on heat exchange in supersonic underexpanded jets of high-enthalpy nitrogen with ceramic specimens based on  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$  at a pressure in the pressure chamber of 8.5 hPa, gas flow rate through the discharge channel of 3.6 g/s, RF-generator power 64 kW were carried out on the induction RF-plasmatron VGU-4 (IPMech RAS). Three heat exchange modes were implemented using water-cooled conical nozzles with output diameters of 30, 40 and 50 mm. For the conditions of experiments in supersonic regimes, the numerical method in the framework of the Navier–Stokes equations and simplified Maxwell equations is used to simulate the flows of nitrogen plasma in the discharge channel of the plasmatron and the flow of underexpanded jets of dissociated nitrogen around a cylindrical holder with a ceramic specimen. From a comparison of experimental and calculated data on heat fluxes to the specimen surface, the effective coefficient of heterogeneous recombination of nitrogen atoms on the ceramic surface at temperatures of  $2273 \div 2843$  K was determined.

Keywords: RF-plasmatron, supersonic dissociated nitrogen flows, heat transfer, CFD modeling, UHTC, catalytic recombination of nitrogen atoms.



Thermal imaging of a ceramic specimen heated in a jet of dissociated nitrogen

УДК 533.6.011.8

# Экспериментальное и численное моделирование теплообмена поверхности ультравысокотемпературной керамики в недорасширенных струях диссоциированного азота

А.Ф. Колесников<sup>1</sup>, В.И. Сахаров<sup>2</sup>, А.В. Чаплыгин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект, д.1*

koles@ipmnet.ru, sakharov@imec.msu.ru

## Аннотация

На индукционном ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) проведены эксперименты по теплообмену в сверхзвуковых недорасширенных струях высокоэнтальпийного азота с керамическими образцами на основе  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$  при давлении в барокамере 8.5 гПа, расходе газа через разрядный канал 3.6 г/с, мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию 64 кВт. Реализованы три режима теплообмена с использованием водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходных сечений 30, 40 и 50 мм. Для условий экспериментов в сверхзвуковых режимах численным методом в рамках уравнений Навье – Стокса и упрощенных уравнений Максвелла выполнено моделирование течений плазмы азота в разрядном канале плазмотрона и обтекания недорасширенными струями диссоциированного азота цилиндрической державки с керамическим образцом. Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных по тепловым потокам к поверхности трех образцов определен эффективный коэффициент гетерогенной рекомбинации атомов азота на поверхности ультравысокотемпературной керамики при температурах 2273 ÷ 2843 К.

Ключевые слова: ВЧ-плазмотрон, недорасширенная струя диссоциированного азота, теплообмен, численное моделирование, ультравысокотемпературная керамика, каталитическая рекомбинация атомов азота.

## 1. Введение

Для задач проектирования современной аэрокосмической техники актуальны вопросы создания и лабораторных испытаний материалов, сохраняющих работоспособность при температурах более 2200 К [1–5]. Перспективными представляются ультравысокотемпературные керамические материалы на основе  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$  и  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ . Испытания образцов подобных материалов могут проводиться в струях диссоциированных газов мощных ВЧ-плазмотронов [6–11], в которых достаточно полно моделируются термохимические факторы воздействия высокоэнтальпийного газового потока на поверхность летательного аппарата при входе в атмосферу с большой скоростью [34]. Существенное практическое и научное значение имеют эксперименты, направленные на исследование гетерогенной каталитической рекомбинации атомов на поверхности материалов. Данный физико-химический процесс играет важную роль в теплообмене поверхности летательных аппаратов при входе в

атмосферу Земли на участках траектории, где реализуется диссоциированный неравновесный пограничный слой [12, 13]. Для ультравысокотемпературных керамик эксперименты по исследованию каталитических свойств по отношению к реакции гетерогенной рекомбинации атомов азота и кислорода проводились в работах [14–17, 35].

В представленной работе приведены результаты расчетно-экспериментального исследования теплообмена и определения каталитических свойств поверхности образцов ультравысокотемпературной керамики на основе  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ , нагреваемых в недорасширенных струях диссоциированного азота ВЧ-плазмотрона ВГУ-4. Образцы были изготовлены в ИОНХ РАН.

Эксперименты по теплообмену выполнены на 100-киловаттном ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) в сверхзвуковых струях частично диссоциированного азота, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходных сечений 30, 40 и 50 мм. Выполнены численные расчеты течений неравновесной плазмы азота в разрядном канале этого плазмотрона при обтекании неравновесной струей частично диссоциированного азота водоохлаждаемой модели с установленным в носовой части образцом ультравысокотемпературной керамики. Рассчитаны тепловые потоки к поверхности керамического образца в точке торможения в зависимости от его температуры при коэффициенте гетерогенной рекомбинации атомов азота  $\gamma_{wN}$  от 0 до 1. Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных по тепловым потокам определены фактические значения  $\gamma_{wN}$  при температурах поверхности  $T_w = 2273 \div 2843$  К и давлениях торможения  $p_{w0} = 0.028 \div 0.047$  атм.

## 2. Эксперименты на плазмотроне ВГУ-4

Эксперименты проводились на 100-киловаттном высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4, основные характеристики которого представлены в таблице 1. Подробное описание плазмотрона ВГУ-4 приведено в [6].

Таблица 1

Основные характеристики установки ВГУ-4

Мощность анодного питания, кВт	12 ÷ 72 (85*)
Частота, МГц	1.76
Диаметр разрядного канала, мм	80
Расход воздуха, г/с	2 ÷ 6
Режим течения потока плазмы	Дозвуковой и сверхзвуковой
Давление в испытательной камере, гПа	6 ÷ 1000

\*кратковременно

Эксперименты на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 проводились в недорасширенных высоконтальпийных струях азота, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходных сечений  $D_s = 30, 40$  и  $50$  мм. Образцы ультравысокотемпературной керамики на основе  $\text{HfB}_2\text{-SiC}$  в виде дисков диаметром  $14$  мм устанавливались в носовой части водоохлаждаемой медной цилиндрической модели диаметром  $d_m = 30$  мм, оснащенной водоохлаждаемым проточным калориметром [18, 19]. Лицевая поверхность образцов была расположена на расстоянии  $30$  мм от среза сопла (рис. 1).

Эксперименты проведены при давлении в барокамере установки  $8.5$  гПа, постоянном расходе газа в разрядном канале  $3.6$  г/с и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию  $64$  кВт.

Измерения средствами оптической пирометрии в ходе экспериментов осуществлялись через оптическое окно барокамеры, изготовленное из  $\text{BaF}_2$ .

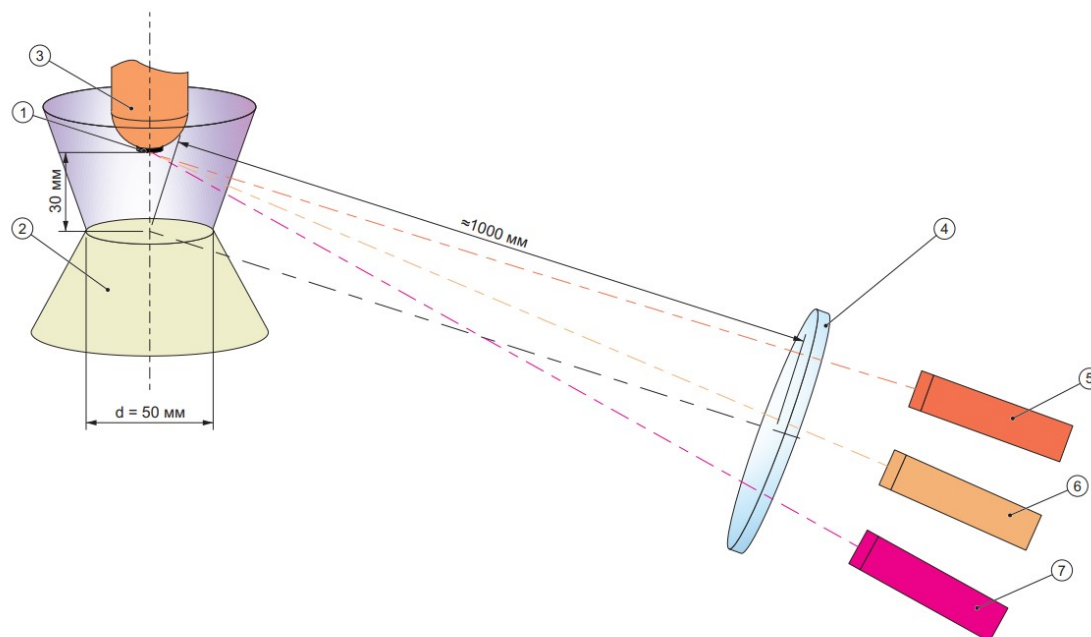


Рис. 1. Схема эксперимента по нагреву керамического образца в высокоэнтальпийной струе азота. 1 – образец керамики; 2 – водоохлаждаемое коническое сопло; 3 – медная водоохлаждаемая модель; 4 – оптическое окно из BaF<sub>2</sub>; 5 – пирометр спектрального отношения «Mikron M770S»; 6 – термовизор «Тандем VS415U»; 7 – пирометр полного излучения «Кельвин-2100»

Цветовая температура лицевой поверхности керамических образцов регистрировалась пирометром спектрального отношения «Mikron M770S». Точность измерений пирометра в диапазоне температур 1000 ÷ 3000 °C составляет ± 15 °C. Показатель визирования используемой модели пирометра – 1:180. Поле температур на лицевой поверхности образцов регистрировалось термовизором «Тандем VS415U» с учетом поправки на пропускание оптического окна барокамеры (0.93). Радиационная температура лицевой поверхности образцов регистрировалась пирометром полного излучения «Кельвин-2100» с аналогичной поправкой на пропускание оптического окна. Массовый расход охлаждающей воды в калориметре измерялся ультразвуковым жидкостным расходомером «Bronkhorst ES-FLOW». Разность температур охлаждающей воды на выходе из калориметра и на входе в него измерялась экранированной дифференциальной термопарой хромель-алюмель. Массовый расход азота высокой химической чистоты в разрядном канале контролировался с помощью электронного газового ротаметра «Bronkhorst MV-306».

На рис. 2 представлены характерные зависимости от времени цветовой температуры нагреваемой поверхности керамического образца ( $T_c$ ), радиационной температуры по данным пирометра полного излучения ( $T_{rad}$ ), разности температур охлаждающей воды на выходе из калориметра и на входе в него ( $\Delta T$ ), массового расхода охлаждающей воды ( $g_{water}$ ), давления в барокамере установки ВГУ-4 ( $p$ ) и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию ( $N$ ), которые регистрировались в процессе экспериментов. Заметные пульсации температуры, вероятно, могут быть связаны с химическими реакциями, протекающими на нагреваемой поверхности образца при воздействии высокоэнтальпийного потока азота.

Тепловой поток к поверхности керамического образца в установившемся режиме определялся из уравнения теплового баланса

$$Q_w = \sigma \cdot T_{rad}^4 \cdot A + \Delta T \cdot C_p \cdot g_{water}, \quad (1)$$

где  $Q_w$  – тепловой поток к лицевой поверхности образца;  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $T_{rad}$  – радиационная температура лицевой поверхности по данным пирометра полного излучения (К);  $A$  – площадь части поверхности образца, излучающей в окружающее пространство (лицевая поверхность и участок боковой поверхности высотой 1 мм);  $\Delta T$  – разность температур охлаждающей воды на выходе из калориметра и на входе в него;  $C_p$  – удельная теплоемкость воды;  $g_{water}$  – массовый расход воды через калориметр.

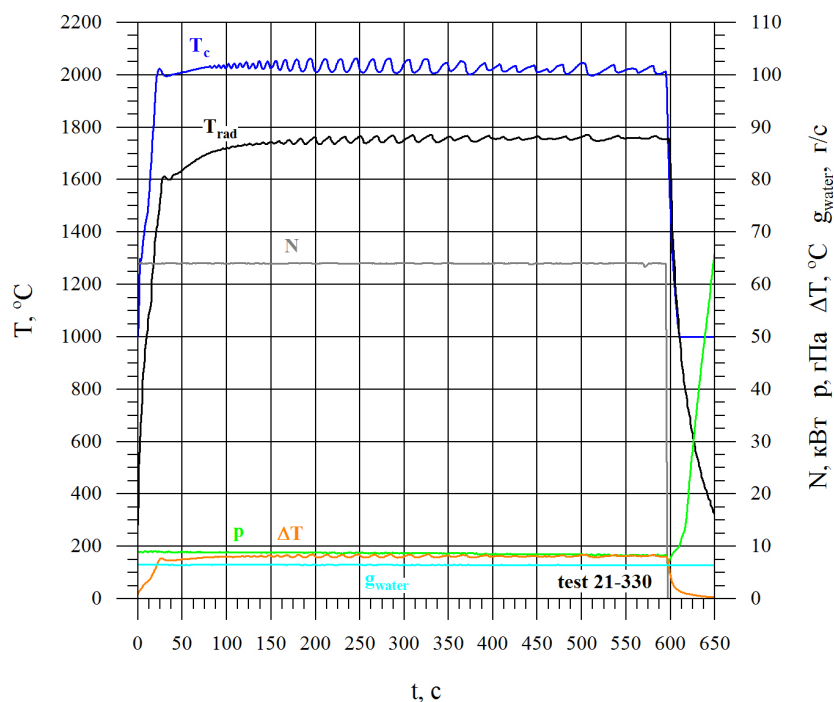


Рис. 2. Основные параметры эксперимента в зависимости от времени: цветовая температура ( $T_c$ ), радиационная температура ( $T_{rad}$ ), разность температур охлаждающей воды на выходе из калориметра и на входе в него ( $\Delta T$ ), массовый расход охлаждающей воды ( $g_{water}$ ), давление в барокамере установки ВГУ-4 ( $p$ ) и мощность ВЧ-генератора плазматрона по анодному питанию ( $N$ )

На рис. 3 показано типичное термоизображение керамического образца, зарегистрированное термовизором «Тандем VS415U», и распределение температуры на поверхности вдоль горизонтальной линии сканирования, из которого видно, что перепад температуры между краем и центром образца не превышал  $50^\circ\text{C}$ .

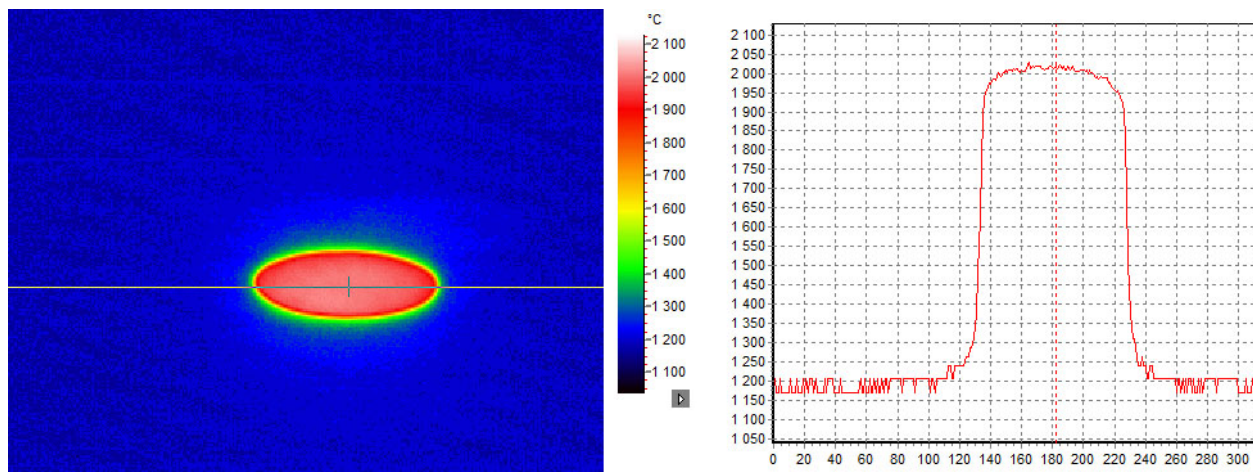


Рис. 3. Термоизображение керамического образца, нагретого в сверхзвуковой струе плазмы азота

Источником погрешности применяемого метода определения теплового потока может служить занижение регистрируемой радиационной температуры поверхности из-за неравномерного распределения температуры по поверхности образца или попадания в область визирования пирометра полного излучения участка водоохлаждаемой поверхности медной модели (последнее связано с достаточно малыми размерами образца).

### 3. Численное моделирование

Численное моделирование неравновесных течений плазмы азота в разрядном канале ВЧ-плазмотрона с индукционным нагревом газов и в истекающих недорасширенных струях диссоциированного и частично ионизованного азота проводилось для условий работы установки ВГУ-4. Геометрия расчетной области и применявшиеся расчетные методы аналогичны использованным в [18] для образцов из графита. Применялась технология, основанная на комплексе программ численного интегрирования уравнений Навье – Стокса [20] и специальных программ-генераторов, взаимодействующих с базами данных по термодинамическим и переносным свойствам индивидуальных газовых веществ [21].

Система нестационарных уравнений Навье – Стокса в квазитрехмерном приближении решалась численно на структурированной криволинейной сетке методом конечного объема. Система конечно-разностных уравнений состояла из численных аналогов уравнений сохранения для четырехугольных ячеек, покрывающих расчетную область, и разностных аппроксимаций граничных условий. Методом конечного объема определялось приближенное решение – значения физических переменных  $Z_{ij}$  (давления, температуры, вектора скорости, концентраций компонентов) в центре каждой ячейки  $(x_{ij}, y_{ij})$  и в центре каждой стороны ячейки  $(x_{wi}, y_{wi})$ , примыкающей к твердой стенке. Невязкие численные потоки  $F_G^{inv}$  через стороны ячейки вычислялись по результату решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва  $Z_G = Ri(Z_G^L, Z_G^R)$  [22], где  $Ri$  – оператор решения задачи Римана. Граничные значения  $Z_G^{L,R}$  определялись по лимитированным одномерным экстраполяционным формулам вектора  $Z$  от центров ячеек к центрам сторон. Численные значения вязких потоков  $F_G^{vis}$  через стороны ячеек определялись по центральным и односторонним разностным формулам второго порядка точности.

Разностные уравнения решались с помощью двухслойной неявной итерационной схемы, основанной на неявной аппроксимации нестационарных уравнений Навье – Стокса. В конструкции неявного итерационного оператора использовалось расщепление Якобианов численных потоков с учетом знаков собственных значений. Приближенное обращение неявного оператора реализовывалось методом последовательной релаксации Гаусса – Зейделя в линиях с применением  $LU$ -разложения блочно-тридиагональных матриц при решении уравнений на каждой линии.

Использовались следующие граничные условия: во входном сечении разрядного канала задавались все необходимые параметры течения, с учетом закрутки потока. На оси канала использовались условия симметрии. Поскольку одновременно рассчитывалось течение и около цилиндрической модели, располагавшейся в барокамере ВЧ-плазмотрона, то в выходном сечении расчетной области ставились "неотражающие" граничные условия. На всех твердых поверхностях (стенка кварцевой трубки, торец входного участка разрядного канала, поверхности звукового сопла и цилиндрической модели) задавались нулевые значения компонент скорости и определенные значения температуры. Для охлаждаемой поверхности медной державки вероятность рекомбинации атомов N принималась равной 0.1.

Стенка разрядного канала полагалась некаталитической. Полная постановка задачи приведена в [23, 24].

Индуктор в расчете заменялся пятью бесконечно тонкими кольцевыми витками. Расчет высокочастотного вихревого электрического поля проведен на основе локально одномерного приближения. Использовались следующие предположения: электромагнитное поле

считалось монохроматическим с заданной частотой, определяемой высокочастотным током в индукторе (частота тока в индукторе 1.76 МГц); плазма квазинейтральна; магнитная проницаемость плазмы  $\mu = 1$ ; диэлектрическая проницаемость плазмы не зависит от электромагнитного поля и, следовательно, не зависит от координат; током смещения можно пренебречь; изменение электрического поля в осевом направлении пренебрежимо мало по сравнению с его изменением в радиальном направлении. При совместном расчете течения плазмы азота и электромагнитного поля в разрядном канале плазмотрона в качестве определяющего параметра задавалась также мощность  $N_{pl}$ , вкладываемая в разряд, а соответствующий ток в индукторе определялся в процессе решения. Значение  $N_{pl}$ , в свою очередь, определялось с помощью калориметрических измерений выносимой мощности из разрядного канала плазмотрона:  $N_{pl} = N_{ap} * Eff(N_{ap})$ . Полная постановка электромагнитной части задачи приведена в [25].

В данной работе многокомпонентная частично ионизованная плазма азота рассматривалась как смесь идеальных газов, в которой могут протекать химические реакции и реакции ионизации. Вращения и колебания молекул описывались моделью «жесткий ротатор - гармонический осциллятор» с больцмановским распределением по энергетическим уровням. Предполагалось, что все компоненты находятся в основном электронном состоянии, а вращательная и колебательная температуры молекул и температура электронов равны поступательной температуре. В расчетах учитывались 5 нейтральных и ионизованных компонентов смеси азота: N, N<sub>2</sub>, N<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> и e<sup>-</sup>. Термодинамические и термохимические данные для рассматриваемых компонентов брались из [21]. Числовые значения констант химических реакций, протекающих в высокотемпературной смеси N, N<sub>2</sub>, N<sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> и e<sup>-</sup>, заимствованы из [26–29].

Транспортная модель необходима для вычисления вязких потоков массы компонентов, импульса и энергии в многокомпонентном газе. Молярные диффузионные потоки определялись из соотношений Стефана – Максвелла для частично ионизованной смеси газа [30] с использованием условий квазинейтральности смеси и отсутствия тока проводимости. Термодиффузией пренебрегалось. Для вычисления коэффициентов вязкости и теплопроводности газовой смеси использовались приближенные формулы Уилке – Васильевой [31]. Проводимость плазмы определялась в пренебрежении скоростью диффузии тяжелых частиц по сравнению с электронами [25].

Бинарные коэффициенты диффузии вычислялись по двухпараметрической интерполяционной формуле [32] через сечения упругих столкновений диффузионного типа нейтральных атомов и молекул между собой и с ионами. Эта формула построена на основе значений сечений при низкой ( $T_1 = 300$  К) и высокой ( $T_2 = 20000$  К) температурах. Взаимодействие заряженных частиц описывается в приближении парных столкновений с использованием экранированного кулоновского потенциала. Для расчета интегралов столкновений этого типа используются аппроксимационные зависимости, приведенные в [33]. Числа Шмидта для всех компонентов, необходимые при расчете коэффициентов вязкости и теплопроводности, вычислялись в предположении, что отношение значений всех сечений столкновений «вязкостного» типа к соответствующим сечениям «диффузионного» типа равно 1.1.

В настоящих расчетах химически неравновесных течений для диссоциированного и частично ионизованного азота предполагалось, что каталитическая рекомбинация атомов азота на поверхности керамического образца (S) описывается простой реакцией первого порядка:  $N + N + S \rightarrow N_2 + S$ , массовый диффузионный поток атомов к поверхности керамического образца имеет вид

$$J_N = -\rho K_{wN} C_N, \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность газа;  $C_N$  – массовая концентрация атомов N. Константа скорости рекомбинации  $K_{wN}$  выражается через эффективный коэффициент рекомбинации  $\gamma_{wN}$

$$K_{wN} = \frac{2\gamma_{wN}}{2 - \gamma_{wN}} \left( \frac{R_A T_w}{2\pi m_N} \right)^{1/2} \quad (3)$$

## 4. Результаты

На рис. 4. представлены результаты расчетов плотности тепловых потоков в точке торможения в зависимости от величины  $\gamma_{wN}$  для выходных диаметров звуковых сопел 30, 40 и 50 мм при давлении в барокамере установки 8.5 ГПа, постоянном расходе газа в разрядном канале 3.6 г/с и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию 64 кВт. Здесь же даны измеренные значения тепловых потоков ( $q$ ) для тех же режимов и соответствующие им расчетные значения эффективного коэффициента гетерогенной рекомбинации ( $\gamma_{wN}$ ). Погрешность измерений тепловых потоков принята равной 10%. Как видно из рис. 4 с учетом погрешности измерений, коэффициент гетерогенной рекомбинации  $\gamma_{wN}$  для всех трех сопел находится в интервале от 0.05 до 0.2.

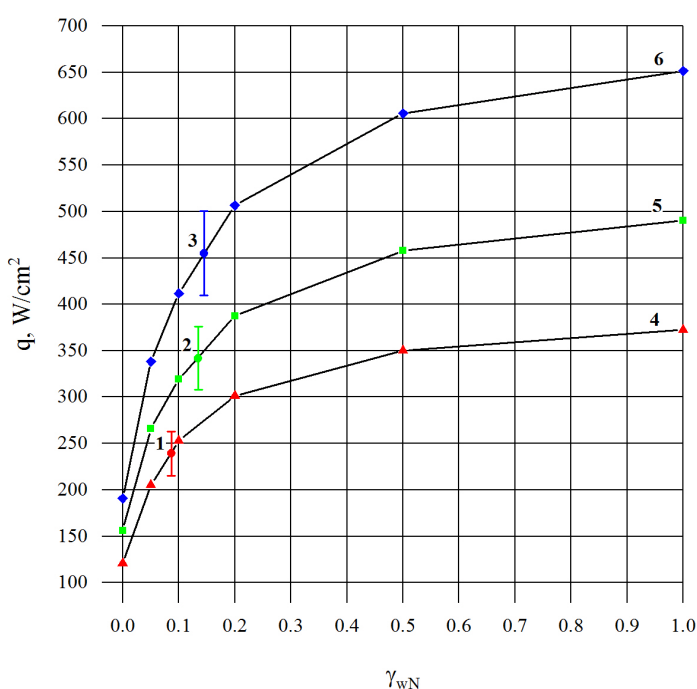


Рис. 4. Измеренные значения тепловых потоков (т. 1, 2, 3) и расчетные плотности тепловых потоков (кривые 4, 5, 6) в зависимости от величины  $\gamma_{wN}$  для диаметров выходного сечения сопла 30 мм (т. 3, кривая 6), 40 мм (т. 2, кривая 5) и 50 мм (т. 1, кривая 4)

В таблице 2 приведены экспериментальные значения тепловых потоков, температуры поверхности керамического образца и расчетные значения давления торможения для трех рассмотренных режимов обтекания. Можно отметить слабо выраженную тенденцию к росту  $\gamma_{wN}$  с ростом температуры поверхности.

Представленные в таблице 2 измеренные значения тепловых потоков близки к зарегистрированным для графитовых образцов при тех же параметрах набегающего потока в работе [18], при этом для сопел с выходными диаметрами 30 и 40 мм цветовая температура поверхности оказалась выше температуры графитовых образцов на 343 и 232 К соответственно. Полученные результаты требуют дальнейшего уточнения в части измерений радиационного теплового потока на поверхности образца, нагретой до высокой температуры.



Таблица 2

**Тепловой поток к керамической поверхности в недорасширенных струях азотной плазмы, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел диаметром 30, 40, 50 мм**

Модель	$T_w$ , К	Измеренная плотность теплового потока $q$ , Вт/см <sup>2</sup>	Эффективный коэффициент гетерогенной рекомбинации, $\gamma_{wN}$	Осредненное давление по поверхности образца (атм)
Сопло диаметром 30 мм	2843	455	0.145	0.047
Сопло диаметром 40 мм	2532	342	0.135	0.036
Сопло диаметром 50 мм	2273	239	0.087	0.028

## 5. Заключение

Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных по тепловым потокам к поверхности образцов ультравысокотемпературной керамики определен эффективный коэффициент гетерогенной рекомбинации атомов азота  $\gamma_{wN}$  на поверхности при температурах 2273 ÷ 2843 К. Для всех трех использовавшихся в экспериментах конических сопел (с выходными диаметрами 30, 40 и 50 мм)  $\gamma_{wN}$  лежит в интервале от 0.05 до 0.2. Таким образом, исследованная керамика на основе  $HfB_2-SiC$  в условиях обтекания сверхзвуковым потоком частично диссоциированного азота проявляет себя как среднекаталитичный материал.

## Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по темам государственных заданий (№ госрегистрации АААА-А16-116021110205-0 и АААА-А20-120011690135-5) при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-01-00056. ВЧ-плазмотрон ВГУ-4 входит в состав уникальной научной установки РФ «Высокочастотные индукционные плазмтроны ВГУ-3 и ВГУ-4» (<http://www.ckp-rf.ru/usu/441568>). Авторы выражают глубокую признательность научному коллективу ИОНХ РАН в лице Е.П. Симоненко и Н.П. Симоненко за предоставленные образцы материалов.

## Литература

1. Simonenko E.P., Sevast'yanov D.V., Simonenko N.P., Sevast'yanov V.G., Kuznetsov N.T. Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications // Russian journal of inorganic chemistry. 2013. Vol. 58. № 14. Pp. 1669–1693. <https://doi.org/10.1134/S0036023613140039>
2. Savino R., Criscuolo L., Di Martino G. D., Mungiguerra S. Aero-thermo-chemical characterization of ultra-high-temperature ceramics for aerospace applications // Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38. № 8. Pp. 2937–2953. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.043>
3. Zhang X., Hu P., Han J., Meng S. Ablation behavior of  $ZrB_2-SiC$  ultra high temperature ceramics under simulated atmospheric re-entry conditions // Composites Science and Technology. 2008. Vol. 68. № 7–8. Pp. 1718–1726. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.02.009>
4. Parthasarathy T.A., Petry M.D., Cinibulk M.K., Mathur T., Gruber M. R. Thermal and oxidation response of UHTC leading edge samples exposed to simulated hypersonic flight conditions // Journal of the American Ceramic Society. 2013. Vol. 96. № 3. Pp. 907–915.
5. Scatteia L., Alfano D., Cantoni S., Monteverde F., Fumo M. D.S., Maso A.D. Plasma torch test of an ultra-high-temperature ceramics nose cone demonstrator // Journal of Spacecraft and Rockets. 2010. Vol. 47. № 2. Pp. 271–279.

6. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Индукционные плазмотроны серии ВГУ // В сб. «Актуальные проблемы механики. Физико-химическая механика жидкостей и газов». М.: Наука, С. 151–177, 2010.
7. Gordeev A.N., Kolesnikov A.F., Yakushin M.I. An Induction Plasma Application to «Buran's» Heat Protection Tiles Ground Tests // SAMPE Journal. 28(3), Pp. 29–33, May/June 1992.
8. Власов В.И., Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кнотько В.Б. Методика и результаты экспериментального определения каталитической активности материалов при высоких температурах // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 5, С. 178–189, 2003.
9. Жестков Б.Е. Исследование термохимической устойчивости теплозащитных материалов // Ученые записки ЦАГИ. Т. XLV, № 5, pp. 62–77, 2014.
10. Chazot O., Krassilchikoff H.V., Thomel J. TPS Ground Testing in Plasma Wind Tunnel for Catalytic Properties Determination. 46th AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2008-1252, Jan. 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-1252>
11. Massuti-Ballester B., Pidan S., Herdrich G., Fertig M. Recent catalysis measurements at IRS // Advances in Space Research. V. 56, Issue 4, P. 742-765, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.04.028>
12. Ковалев В.Л. Гетерогенные каталитические процессы при входе в атмосферу. М.: МГУ, 126 с., 1999.
13. Ковалев В.Л., Колесников А.Ф. Экспериментальное и теоретическое моделирование гетерогенного катализа в аэротермохимии (обзор). // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 5, С. 3–31, 2005.
14. Marschall J. Chamberlain A., Crunkleton D., Rogers B. Catalytic atom recombination on ZrB<sub>2</sub>/SiC and HfB<sub>2</sub>/SiC ultrahigh-temperature ceramic composites // Journal of Spacecraft and Rockets. 2004. Vol. 41. № 4. Pp. 576–581.
15. Marschall J., Pejaković D. A., Fahrenholtz W. G., Hilmas G. E., Panerai F., Chazot O. Temperature jump phenomenon during plasmatron testing of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultrahigh-temperature ceramics // Journal of thermophysics and heat transfer. 2012. Vol. 26. № 4. Pp. 559–572.
16. Scatteia L., Borrelli R., Cosentino G., Bêche E., Sans J. L., Balat-Pichelin M. Catalytic and radiative behaviors of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultrahigh temperature ceramic composites // Journal of Spacecraft and rockets. 2006. Vol. 43. № 5. Pp. 1004–1012.
17. Marschall J., Fletcher D. G. High-enthalpy test environments, flow modeling and in situ diagnostics for characterizing ultra-high temperature ceramics // Journal of the European Ceramic Society. 2010. Vol. 30. № 11. Pp. 2323–2336.
18. Колесников А.Ф., Лукомский И.В., Сахаров В.И., Чаплыгин А.В. Экспериментальное и численное моделирование теплообмена поверхности графита в недорасширенных струях диссоциированного азота // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2021. № 6. С. 136–144. <https://doi.org/10.31857/S0568528121060074>
19. Патент на полезную модель № 205572 U1 Российская Федерация, МПК G01N 25/00. Устройство для измерения теплового потока к поверхности материала, нагретого в струе высокоэнтальпийного газа до высоких температур: № 2021109253; заявл. 05.04.2021; опубл. 21.07.2021 / И.В. Лукомский, А.В. Чаплыгин, А.Ф. Колесников.
20. 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. Pp. 323–328, 2004.
21. Термодинамические свойства индивидуальных веществ / ред. В.П.Глушко. М.: Наука, 1978. Т.1. Кн. 1. 495с; Т.1. Кн. 2. 327с
22. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
23. 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 // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 5, С. 156–168, 2002.

24. Сахаров В.И. Численное моделирование термически и химически неравновесных течений и теплообмена в недорасширенных струях индукционного плазмотрона // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 6, С. 157–168, 2007.
25. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное моделирование течений равновесной индукционной плазмы в цилиндрическом канале плазмотрона // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 5, С. 164–173, 2000.
26. Ибрагимова Л.Б., Смехов Г.Д., Шаталов О.П. Константы скорости диссоциации двухатомных молекул в термически равновесных условиях // Известия РАН. Механика жидкости и газа. №1. С. 181–186, 1999. <https://doi.org/10.1007/BF02698767>
27. Лосев С.А., Макаров В.Н., Погосбекян М.Ю. Модель физико-химической кинетики за фронтом очень сильной ударной волны в воздухе // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 2, С. 169–182, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF02029844>
28. Park C. Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions, Earth Entries // J. Thermophys and Heat Transfer. Vol.7, No.3, Pp. 385–398, 1993. <https://doi.org/10.2514/3.496>
29. Losev S.A., Makarov V.N., Pogosbekyan M.Ju., Shatalov O.P., Nikol'sky V.S., Thermochemical nonequilibrium kinetic models in strong shock waves on air // AIAA Paper, № 1994. 13 p. 1990. <https://doi.org/10.2514/6.1994-1990>
30. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 929 с.
31. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. The Properties of Gases and Liquids. McGraw-Hill, N. Y.: 1977. 688 p.
32. Afonina N.E., Gromov V.G. Thermochemical nonequilibrium computations for a MARS express probe // Proc. 3rd Europ. Symp. Aerothermodynam. Space Vehicles, ESTEC, Noordwijk. The Netherlands. 1998. Pp. 179–186.
33. Гордеев О.А., Калинин А.П., Комов А.Л., Люстерник В.Е., Самуйлов Е.В., Соколова И.А., Фокин Л.Р. Потенциалы взаимодействия, упругие сечения, интегралы столкновений компонентов воздуха для температур до 20000 К. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ / ТФЦ. Москва, ИВТАН. 1985. № 5 (55). 100 с.
34. Васильевский, С. А., Гордеев, А. Н., Колесников, А. Ф., Сахаров, В. И., Симоненко, Е. П., Симоненко Н. П. Экспериментальное и численное исследование теплообмена высокоэнтальпийных потоков воздуха с цилиндрическими моделями из меди и с образцами из керамики на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2018. Т. 19, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-1/articles/731/>
35. Жестков, Б. Е., Сахаров, В. И., Сенюев, И. В. Расчетно-экспериментальное исследование каталитической активности сверх высокотемпературной керамики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2019. Т. 20, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-2/articles/819/>

## References

1. Simonenko, E. P., Sevast'yanov, D. V., Simonenko, N. P., Sevast'yanov, V. G., Kuznetsov, N. T., "Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications," *Russian journal of inorganic chemistry*, Vol. 58, No. 14, 2013, pp. 1669–1693. <https://doi.org/10.1134/S0036023613140039>
2. Savino, R., Criscuolo, L., Di Martino, G. D., Mungiguerra, S., "Aero-thermo-chemical characterization of ultra-high-temperature ceramics for aerospace applications," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 38, No. 8, 2018, pp. 2937–2953. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.043>
3. Zhang, X., Hu, P., Han, J., Meng, S., "Ablation behavior of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultrahigh temperature ceramics under simulated atmospheric re-entry conditions," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 7–8, 2008, pp. 1718–1726. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.02.009>

4. Parthasarathy, T. A., Petry, M. D., Cinibulk, M. K., Mathur, T., Gruber, M. R., “Thermal and oxidation response of UHTC leading edge samples exposed to simulated hypersonic flight conditions,” *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 96, No. 3, 2013, pp. 907–915.
5. Scatteia, L., Alfano, D., Cantoni, S., Monteverde, F., Fumo, M. D. S., Maso, A. D., “Plasma torch test of an ultra-high-temperature ceramics nose cone demonstrator,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 47, No. 2, 2010, pp. 271–279.
6. Gordeev, A. N., Kolesnikov, A. F., *Indukcionnye plazmotrony serii VGU* (Induction plasmatrons of the VGU series), V sb. «Aktual'nye problemy mehaniki. Fiziko-himicheskaja mehanika zhidkostej i gazov». M.: Nauka, 2019, pp. 151–177 [in Russian].
7. Gordeev, A. N., Kolesnikov, A. F., Yakushin, M. I., “An Induction Plasma Application to "Buran's" Heat Protection Tiles Ground Tests,” *SAMPE Journal*, Vol. 28, No. 3, May/June 1992, pp. 29–33.
8. Vlasov, V. I., Zalogin, G. N., Zemljanskij, B. A., Knot'ko, V. B., “Methods and results of an experimental investigation of the catalytic activity of materials at high temperatures,” *Fluid Dynamics*, Vol. 38(5), 2003, pp. 815–825.
9. Zhestkov, B. E., “Investigation of thermochemical stability of thermal protection materials,” *TsAGI Sci. J.*, Vol. 45(8), 2014, pp. 781–802.
10. Chazot, O., Krassilchikoff, H. V., Thomel, J., “TPS ground testing in plasma wind tunnel for catalytic properties determination,” *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 2008-1252, Jan. 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-1252>
11. Massuti-Ballester, B., Pidan, S., Herdrich, G., Fertig, M., “Recent catalysis measurements at IRS,” *Adv. Space Res.*, Vol. 56, No. 4, 2015, pp. 742–765. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.04.028>
12. Kovalev, V. L., *Geterogennye kataliticheskie processy pri vhode v atmosferu* (Heterogeneous Catalytic Processes during the Entry into the Atmosphere), Moscow Univ. Press, 1999 [in Russian].
13. Kovalev, V. L., Kolesnikov, A. F., “Experimental and theoretical simulation of heterogeneous catalysis in aerothermochemistry (a Review),” *Fluid Dynamics*, Vol. 40(5), 2005, pp. 669–693.
14. Marschall, J., Chamberlain, A., Crunkleton, D., Rogers, B., “Catalytic atom recombination on ZrB<sub>2</sub>/SiC and HfB<sub>2</sub>/SiC ultrahigh-temperature ceramic composites,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 41, No. 4, 2004, pp. 576–581.
15. Marschall, J., Pejaković, D. A., Fahrenholtz, W. G., Hilmas, G. E., Panerai, F., Chazot, O., “Temperature jump phenomenon during plasmatron testing of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultrahigh-temperature ceramics,” *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 26, No. 4, 2012, pp. 559–572.
16. Scatteia, L., Borrelli, R., Cosentino, G., Bêche, E., Sans, J. L., Balat-Pichelin, M., “Catalytic and radiative behaviors of ZrB<sub>2</sub>-SiC ultrahigh temperature ceramic composites,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 43, No. 5, 2006, pp. 1004–1012.
17. Marschall, J., Fletcher, D. G., “High-enthalpy test environments, flow modeling and in situ diagnostics for characterizing ultra-high temperature ceramics,” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 30, No. 11, 2010, pp. 2323–2336.
18. Kolesnikov, A. F., Lukomskii, I. V., Chaplygin, A. V., Sakharov, V. I., “Experimental and Numerical Modeling of Heat Transfer to Graphite Surface in Underexpanded Dissociated-Nitrogen Jets,” *Fluid Dynamics*, Vol. 56, No 6, 2021, pp. 897–905. <https://doi.org/10.1134/S0015462821060070>
19. Lukomsky, I. V., Chaplygin, A. V., Kolesnikov, A. F., Utility model patent No. 205572 U1 Russian Federation, IPC G01N 25/00. A device for measuring the heat flow to the surface of a material heated in a jet of high-enthalpy gas to high temperatures: No. 2021109253: application 05.04.2021: publ. 21.07.2021
20. Afonina, N. E., Gromov, V. G., Sakharov, V. I., “HIGHTEMP technique of high temperature gas flows numerical simulations,” *Proc. 5th Europ. Symp. on Aerothermodyn. Space Vehicles*, Cologne, Germany, 2004. SP 563 (ESTEC, Noordwijk, 2004), pp. 323–328.
21. Glushko, V. P. (ed.), *Termodinamicheskie svoystva individual'nyh veshhestv* (Thermodynamic Properties of Individual Materials). Vols. 1 and 2. Nauka, Moscow, 1978 [in Russian].

22. Godunov, S. K., Zabrodin, A. V., Ivanov, M. Ya., Kraiko, A. N., Prokopov, G. P., *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* (Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gasdynamics), Nauka, Moscow, 1976 [in Russian].
23. Afonina, N. E., Vasil'evskii, S. A., Gromov, V. G., Kolesnikov, A. F., Pershin, I. S., Sakharov, V. I., Yakushin, M. I., "Flow and heat transfer in underexpanded jets issuing from the sonic nozzle of a plasmatron," *Fluid Dynamics*, Vol. 37(5), 2002, pp. 803–814.
24. Sakharov, V. I., "Numerical simulation of thermally and chemically nonequilibrium flows in underexpanded induction plasmatron jets," *Fluid Dynamics*, Vol. 42(6), 2007, pp. 1007–1016.
25. Vasil'evskii, S. A., Kolesnikov, A. F., "Numerical simulation of equilibrium induction plasma flows in a cylindrical plasmatron channel," *Fluid Dynamics*, Vol. 35(5), 2000, pp. 769–772.
26. Ibragimova, L. B., Smekhov, G. D., Shatalov, O. P., "Dissociation rate constants of diatomic molecules under thermal equilibrium conditions," *Fluid Dynamics*, Vol. 34(1), 1999, pp. 153–157. <https://doi.org/10.1007/BF02698767>
27. Losev, S. A., Makarov, V. N., Pogosbekyan, M. Yu., "Model of physic-chemical kinetics behind the front of a very intense shock wave in air," *Fluid Dynamics*, Vol. 30(2), 1995, pp. 299–309. <https://doi.org/10.1007/BF02029844>
28. Park, C., "Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions, Earth entries," *J. Thermophys. Heat Transfer*, Vol. 7, No. 3, 1993, pp. 385–398.
29. Losev, S. A., Makarov, V. N., Pogosbekyan, M. Ju., Shatalov, O. P., Nikol'sky, V. S., "Thermochemical nonequilibrium kinetic models in strong shock waves on air," *6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, AIAA Paper 94–1990, June 1994. <https://doi.org/10.2514/6.1994-1990>
30. Hirschfelder, J. O., Curtiss, C. F., Bird, R. B., *Molecular Theory of Gases and Liquids*, Wiley, New York, 1954.
31. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Sherwood, T. K., *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, New York, 1977.
32. Afonina, N. E., Gromov, V. G., "Thermochemical nonequilibrium computations for a MARS Express Probe," *Proc. 3rd Europ. Symp. Aerothermodynam. Space Vehicles*, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 1998, pp. 179–186.
33. Gordeev, O. A., Kalinin, A. P., Komov, A. L., Lusternik, V. E., Samuilov, E. V., Sokolova, I. A., Fokin, L. R., *Interaction potentials, elastic cross-sections, and collision integrals of the air components for the temperatures up to 20000 K. Reviews on thermal properties of materials*, Joint Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, No. 5(55), 1985.
34. Vasil'evskii, S. A., Gordeev, A. N., Kolesnikov, A. F., Sakharov, V. I., Simonenko, E. P., Simonenko, N. P., "Experimental and numerical study of heat transfer to cylindrical copper models and HfB<sub>2</sub>-SiC ceramic samples in high-enthalpy air jets using RF-plasmatron IPG-4," *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 19, No. 1, 2018. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-1/articles/731/>
35. Zhestkov, B. E., Sakharov, V. I., Senyuev, I. V., "Numerical and experimental study of catalytic activity of super high-temperature ceramics," *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 20, No. 2, 2019. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-2/articles/819/>

Статья поступила в редакцию 1 марта 2022г.