

# Investigation of Influence of Model Geometry on Convective Heat Transfer to Cold Catalytic Surface in Supersonic Dissociated Air Flows in HF-Plasmatron

S. S. Galkin<sup>1</sup>, 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*

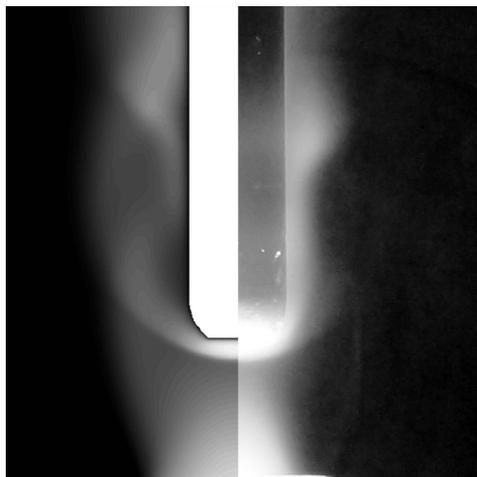
<sup>2</sup> *Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russia*

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

## Abstract

Heat transfer experiments were carried out by 100-kW power RF-plasmatron VGU-4 at IPMech RAS. Heat transfer rates were investigated in underexpanded dissociated air jets using three different cylindrical watercooled copper 20-mm diameter models with flat nose, spherical nose, and rounded edge combined with flat end. Stagnation point heat fluxes were measured using water flow copper calorimeters with flat and spherical front faces. Heat flux measurements were fulfilled in dissociated air jets run out water-cooled conical nozzles with diameter 40 and 50 mm at the ground pressure 8.5 hPa, mass flow rate 3.6 g/s and RF-generator anode power 64 kW. Distance between stagnation point on model surface and conical nozzle exit was 30 mm. For RF-plasmatron supersonic tests conditions CFD modelling nonequilibrium dissociated air flow fields around different models were carried out taking into account chemical gas-phase and surface catalytic reactions. Acceptable agreement between experimental data related to copper surface and numerical computations in terms of stagnation point fluxes were achieved at the effective surface atom recombination rate  $\gamma = 0.1$ .

Keywords: HF-plasmatron, supersonic dissociated air flows, heat transfer, CFD modeling, catalytic recombination of atoms.



Supersonic high-enthalpy air flow field around a water-cooled model: numerical (left) and experimental (right)

УДК 533.6.011.8

# Исследование влияния формы модели на конвективные тепловые потоки к холодной каталитической поверхности в сверхзвуковых струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазмотроне

С. С. Галкин<sup>1</sup>, 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, Москва, 119192, Мичуринский проспект д.1,*

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

## Аннотация

Эксперименты по теплообмену проводились на 100-киловаттном высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4. Теплообмен в недорасширенных струях диссоциированного воздуха исследовался на трех медных водоохлаждаемых цилиндрических моделях диаметром 20 мм: с плоским торцом, со сферической носовой частью, со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части. Тепловые потоки в носовой части моделей измерялись проточными стационарными калориметрами с плоской или сферической тепловоспринимающей поверхностью из меди. Измерения проведены в недорасширенных струях высокоэнтальпийного воздуха, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходных сечений 40 и 50 мм при давлении в затопленном пространстве 8.5 гПа, расходе воздуха 3.6 г/с и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию 64 кВт. Расстояние между передней критической точкой модели и срезом сопла во всех экспериментах составляло 30 мм. Для условий экспериментов выполнено численное моделирование обтекания моделей различной геометрии в рамках уравнений Навье – Стокса для многокомпонентного неравновесно диссоциированного воздуха с учетом химических реакций в потоке и на холодной поверхности. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных данных по тепловым потокам в точке торможения при эффективном коэффициенте гетерогенной рекомбинации  $\gamma = 0.1$ .

Ключевые слова: индукционный ВЧ-плазмотрон, сверхзвуковые струи диссоциированного воздуха, тепловые потоки в точке торможения, численное моделирование, каталитическая рекомбинация атомов.

## 1. Введение

Индукционные ВЧ-плазмотроны используются для аэрофизических исследований, в том числе для испытаний образцов теплозащитных материалов с целью определения их термохимической стойкости или каталитических свойств их поверхности по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов. Преимущества ВЧ-плазмотронов заключаются в том, что они позволяют в непрерывном режиме работы получать до- и сверхзвуковые потоки чистой низкотемпературной плазмы с высокой стабильностью и хорошей воспроизводимостью. Хотя в лабораторных высокоэнтальпийных установках невозможно полностью моде-

лизовать натурные условия аэродинамического нагрева поверхности тела при входе в атмосферу, однако возможно локальное моделирование условий теплопередачи от пограничного слоя к критической точке на поверхности.

Широкие возможности для локального моделирования аэродинамического нагрева в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха предоставляет 100-киловаттный ВЧ-плазмотрон ВГУ-4 (ИПМех РАН) [1, 11]. Полную энтальпию и давление торможения можно плавно регулировать в диапазонах  $5 \div 50$  МДж/кг и  $0.02 \div 1$  атм. При фиксированных значениях мощности ВЧ-генератора и давления в барокамере градиент скорости на внешней границе пограничного слоя около модели можно варьировать за счет изменений формы моделей и геометрии разрядного канала, применяя водоохлаждаемые конические насадки с различными диаметрами выходных сечений.

Цель данной работы заключается в экспериментальном и численном исследовании теплообмена водоохлаждаемых моделей различной формы со сверхзвуковыми струями диссоциированного воздуха для условий, реализуемых на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 при работе с коническими соплами с диаметром выходных сечений 40 и 50 мм. Тепловые потоки измерялись в окрестности критической точки на трех медных водоохлаждаемых цилиндрических моделях диаметром 20 мм: с плоским торцом, со сферической носовой частью, со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части.

## 2. Эксперименты на плазмотроне ВГУ-4

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

Таблица 1

Основные характеристики установки ВГУ-4

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

\*кратковременно

Теплообмен в недорасширенных струях диссоциированного воздуха исследовался на трех медных водоохлаждаемых цилиндрической моделях диаметром  $d_m = 20$  мм (рис. 1): с плоским торцом (рис. 1, а), со сферической носовой частью (рис. 1, б), со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части (рис. 1, в).

Для измерений теплового потока в носовой части моделей устанавливались проточные стационарные датчики (калориметры) [2] с плоской или сферической тепловоспринимающей поверхностью из меди. Тепловоспринимающие поверхности калориметров перед каждым экспериментом полировались и обрабатывались спиртом. Диаметр тепловоспринимающей поверхности калориметров составлял  $11.7 \div 11.8$  мм. Во всех экспериментах медная тепловоспринимающая поверхность калориметров предварительно окислялась не менее пяти минут в струе воздушной плазмы (до образования устойчивой оксидной пленки и выхода теплового потока на стационарное значение). Массовый расход охлаждающей воды в калориметрах измерялся ротаметром, калибровка которого выполнялась непосред-

ственно перед экспериментом. Разность температур охлаждающей воды на выходе из калориметра и на входе в него измерялась экранированной дифференциальной термопарой хромель-алюмель.

Эксперименты по определению тепловых потоков в сверхзвуковых режимах плазмотрона ВГУ-4 проводились в недорасширенных струях высокоэнтальпийного воздуха, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходных сечений  $D = 40$  и  $50$  мм при давлении в затопленном пространстве  $P_\infty = 8.5$  гПа, расходе воздуха  $G = 3.6$  г/с и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию  $N = 64$  кВт. Расстояние между передней критической точкой модели и срезом сопла во всех экспериментах составляло  $Z = 30$  мм.

Регистрация параметров экспериментов производилась программным комплексом АС-Test с помощью внешнего модуля АЦП Е-270. Измерения основных параметров производились 1 раз в секунду. Регистрация давления осуществлялась датчиком АИР-20/М2-ДА с точностью измерения  $\pm 0.2\%$ . Регистрация мощности анодного питания ВЧ-плазмотрона осуществлялась с помощью построенных на высокоточных шунтах сенсоров, входящих в состав ВЧ-генератора плазмотрона ВГУ-4 и АЦП Е-270. Расход воздуха задавался расходомерной шайбой, прокалиброванной по цифровому расходомеру-контроллеру.

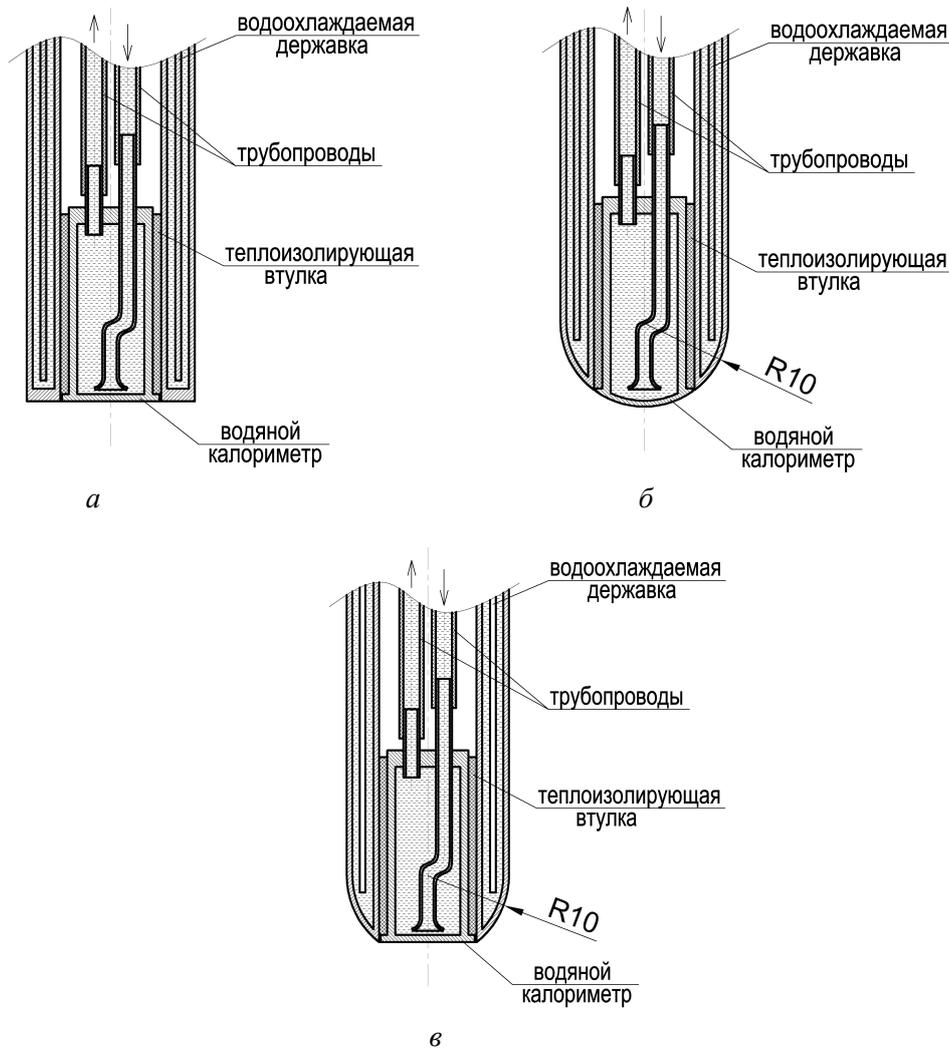


Рис. 1. Медные водоохлаждаемые цилиндрические модели диаметром  $d_m = 20$  мм, оснащенные проточными стационарными датчиками теплового потока (калориметрами)

### 3. Численное моделирование

Для условий экспериментов на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 численно решались задачи обтекания моделей трех различных форм с холодной поверхностью ( $T_w = 300$  К) сверхзвуковыми неравновесными струями диссоциированного воздуха в рамках уравнений Навье–Стокса в интервале  $0 \leq \gamma_w \leq 1$ . Применялась технология, основанная на комплексе программ численного интегрирования уравнений Навье–Стокса [15, 16] и специальных программ-генераторов, взаимодействующих с базами данных по термодинамическим и переносным свойствам индивидуальных газовых веществ. При численном моделировании учитывались 11 нейтральных и ионизованных компонентов смеси воздушной плазмы: O, N, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO, O<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, NO<sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup> и e<sup>-</sup>. Термодинамические и термохимические данные для рассматриваемых компонентов брались из [17]. Числовые значения констант химических реакций, протекающих в высокотемпературной воздушной смеси, заимствованы из [18–21]. 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 с использованием условий квазинейтральности смеси [22]. Термодиффузией пренебрегалось. Для вычисления коэффициентов вязкости и теплопроводности газовой смеси использовались приближенные формулы Уилки–Васильевой [23].

Бинарные коэффициенты диффузии вычислялись по двухпараметрической интерполяционной формуле [24] через сечения упругих столкновений диффузионного типа атомов и молекул между собой и с ионами. Взаимодействие заряженных частиц описывается в приближении парных столкновений с использованием экранированного кулоновского потенциала. Для расчета интегралов столкновений этого типа используются аппроксимационные зависимости, приведенные в [25]. 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.

### 4. Результаты экспериментов и сравнение с расчетом

На рис. 2 представлено сравнение экспериментальных и расчетных картин обтекания недорасширенными струями воздушной плазмы цилиндрических моделей со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части (рис. 2, а) и со сферической носовой частью (рис. 2, б).

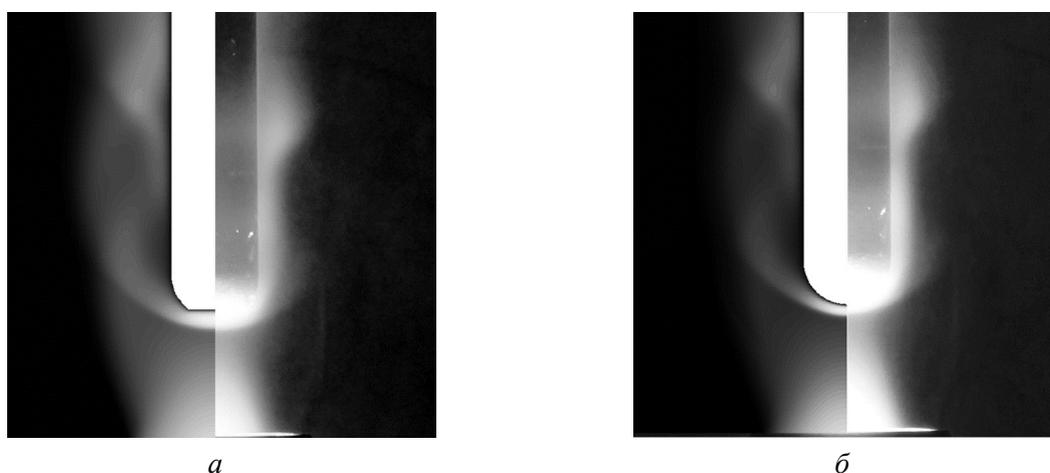


Рис. 2. Рассчитанная (слева) и экспериментальная (справа) картины течения около цилиндрических моделей со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части (а) и со сферической носовой частью (б):  $G = 3.6$  г/с,  $N = 64$  кВт,  $P_\infty = 8.5$  гПа,  $D = 40$  мм,  $Z = 30$  мм,  $d_m = 20$  мм

В правых частях рисунков приведены фотографии картин обтекания, полученные в процессе экспериментов, в левых – температурные контуры полей течений, полученные расчетным путем. Картины обтекания получены для случая истечения недорасширенных струй воздушной плазмы из водоохлаждаемого конического сопла диаметром  $D = 40$  мм. Наблюдается приемлемое совпадение экспериментальных и расчетных картин обтекания моделей как около лобовой части, так и у боковой поверхности моделей. На рис. 2 видно хорошее соответствие формы и положения ударно нагретого слоя газа у лобовой поверхности моделей.

Для модели с плоским торцом подобное качественное сравнение картин обтекания на различных режимах проводилось ранее [3].

Рассчитанные плотности тепловых потоков в точке торможения трех моделей при высокоскоростном обтекании для параметров из табл. 2 сравнивались с измеренными тепловыми потоками. В табл. 2 и 3 приведены экспериментальные данные измерений тепловых потоков и результаты расчетов для соответствующих режимов при эффективном коэффициенте гетерогенной рекомбинации  $\gamma = 0.1$ . При использовании сопла с выходным сечением диаметром 40 мм расхождение расчета с экспериментом для всех рассмотренных моделей не превышало 7%. Для сопла с диаметром выходного сечения  $D = 50$  мм наиболее существенное отклонение эксперимента от расчета наблюдалось на модели со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части и составило 12.6%. При этом для двух других моделей отклонение эксперимента от расчета находилось в пределах  $7 \div 8$ %, что допустимо с учетом оценки погрешности метода измерений с использованием стационарных проточных датчиков теплового потока в  $5 \div 10$  % [4].

Таблица 2

**Тепловой поток к холодной медной поверхности в недорасширенных струях воздушной плазмы, истекающих из водоохлаждаемого конического сопла диаметром 40 мм**

Модель	Измеренная плотность теплового потока $q_{\text{exp}}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Расчетная плотность теплового потока $q_{\text{calc}}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Различие в % по отношению к расчету
Цилиндр диаметром 20 мм с плоским торцом	509	479.88	6.1
Цилиндр диаметром 20 мм со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части	537	547.11	1.8
Цилиндр диаметром 20 мм со сферической носовой частью	587	558.64	5.1

Таблица 3

**Тепловой поток к холодной медной поверхности в недорасширенных струях воздушной плазмы, истекающих из водоохлаждаемого конического сопла диаметром 50 мм**

Модель	Измеренная плотность теплового потока $q_{\text{exp}}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Расчетная плотность теплового потока $q_{\text{calc}}$ , Вт/см <sup>2</sup>	Различие в % по отношению к расчету
Цилиндр диаметром 20 мм с плоским торцом	342	370.12	7.6
Цилиндр диаметром 20 мм со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части	386	441.59	12.6
Цилиндр диаметром 20 мм со сферической носовой частью	495	468	5.7

## 5. Заключение

Для условий экспериментов по теплообмену на установке ВГУ-4 в сверхзвуковых высокоэнтальпийных недорасширенных струях воздуха для трех цилиндрических моделей диаметром 20 мм из меди с плоским торцом, со сферической носовой частью, со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части рассчитаны плотности тепловых потоков в носовой части. При этом отклонение экспериментальных значений от расчетных находилось в пределах  $7 \div 8 \%$ , что допустимо с учетом оценки погрешности метода измерений с использованием стационарных проточных датчиков теплового потока в  $5 \div 10 \%$ . Визуализация картин обтекания в расчетах и в экспериментах дает хорошее совпадение газодинамических картин обтекания для всех трех моделей.

## 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.

## Литература

1. Gordeev A.N., Kolesnikov A.F., Yakushin M.I. An Induction Plasma Application to "Buran's" Heat Protection Tiles Ground Tests // SAMPE Journal. 1992. Vol. 28. No. 3. Pp. 29–33.
2. Залогин Г.Н., Землянский Б.А., Кнотьюко В.Б., Мурзинов И.Н., Румынский А.Н., Кузьмин Л.А. Высокоэнтальпийный плазматрон – установка для исследований аэрофизических проблем с использованием высокоэнтальпийных газовых потоков // Космонавтика и ракетостроение. 1994. № 2. С. 22–32.
3. Жестков Б.Е. Исследование термохимической устойчивости теплозащитных материалов // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 5. С. 62–77.
4. Chazot O., Krassilchikoff H.V., Thomel J. TPS Ground Testing in Plasma Wind Tunnel for Catalytic Properties Determination. 46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2008-1252, Jan. 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-1252>
5. Herdrich G., Auweter-Kurtz M., Kurtz H., Laux T., Winter M. Operational Behavior of Inductively Heated Plasma Source IPG-3 for Entry Simulations // J. Thermophys. Heat Trans. 2002. Vol. 16. No. 3. <https://doi.org/10.2514/2.6698>
6. Bourdon A., Bultel A., Desportes A., van Ootegem B., Vervisch P. Catalycity Studies of TPS in a 90kW Plasmatron at CORIA. Presented at the 2<sup>nd</sup> International Symposium “Atmospheric Reentry Vehicles and Systems”, Arcachon (France), March 26–29, 2001.
7. Fletcher D.G., Meyers J.M. Surface Catalyzed Reaction Efficiencies in Oxygen Plasmas from Laser Induced Fluorescence Measurements // J. Thermophys. Heat Trans. 2017. V. 31. No. 2. Pp. 410–420. <https://doi.org/10.2514/1.T4923>
8. 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.
9. Kolesnikov A.F. The Concept of Local Simulation for Stagnation Point Heat Transfer in Hypersonic Flows: Applications and Validation. AIAA 2000-2515. 2000. <https://doi.org/10.2514/6.2000-2515>
10. Колесников А.Ф. Условия локального подобия термохимического взаимодействия высокоэнтальпийных потоков газов с неразрушаемой поверхностью // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 118–125. <https://doi.org/10.7868/S004036441306015X>
11. Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А. Моделирование нагрева в критической точке и определение каталитической активности поверхности для спускаемого аппарата «EXPERT»// Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2010. Т. 9. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/123/>

12. Колесников А.Ф., Гордеев А.Н., Васильевский С.А., Тептеева Е.С. Влияние геометрии разрядного канала ВЧ-плазмотрона на теплообмен в высокоэнтальпийных дозвуковых струях воздуха // ТВТ. 2019. Т. 57. № 4. С. 509–517. <https://doi.org/10.1134/S0040364419040112>
13. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное исследование течений и теплообмена в индукционной плазме высокочастотного плазмотрона // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Том VII-1. Часть 2. М., изд-во Янус-К. 2008. С. 220–234.
14. Петухов И.В. Численный расчет двумерных течений в пограничном слое // В сб. «Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы». М.: Наука. 1964. С. 304–325.
15. 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. Pp. 323–328.
16. 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.
17. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание. М.: Наука, 1978. Т.1. Кн. 1. 495с; Т.1. Кн. 2. 327 с.
18. Ибрагимова Л.Б., Смахов Г.Д., Шаталов О.П. Константы скорости диссоциации двухатомных молекул в термически равновесных условиях // Изв. РАН МЖГ. 1999. №1. С. 181–186.
19. Лосев С.А., Макаров В.Н., Погосбемян М.Ю. Модель физико-химической кинетики за фронтом очень сильной ударной волны в воздухе // Изв. РАН МЖГ. 1995. №2. С. 169–182. <https://doi.org/10.1007/BF02029844>
20. Park C., Howe J.T., Jaffe R.L., Candler G.V. Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions. II: Mars Entries//Journal Thermophys. Heat Trans. 1994. V.8. No.1. Pp. 9–23. <https://doi.org/10.2514/3.496>
21. 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. 1990. № 1994. 13 p. <https://doi.org/10.2514/6.1994-1990>
22. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 929 с.
23. Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K. The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill, N. Y.: 1977. 688 p.
24. 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.
25. Гордеев О.А., Калинин А.П., Комов А.Л., Люстерник В.Е., Самуйлов Е.В. Обзоры по теплофизическим свойствам веществ. ТФЦ-М: ИВТАН, 1985. № 5 (55). 100 с.
26. Колесников А.Ф., Сахаров В.И. Подобие теплообмена модели в недорасширенных струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазмотроне и при обтекании сферы высокоскоростным потоком в атмосфере // Изв. РАН МЖГ. 2016. № 3. С. 110–116. <https://doi.org/10.7868/S0568528116030099>
27. Лунев В.В. Гиперзвуковая аэродинамика. М.: Машиностроение. 1975. 328 с.
28. Колесников А.Ф., Якушин М.И. Условия моделирования конвективного теплообмена тел с гиперзвуковыми потоками на индукционных плазмотронах // ТВТ. 1988. Т. 26. № 4. С. 742–750.

## References

1. 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, 1992, pp. 29–33.

2. Zalogin, G. N., Zemljanskij, B. A., Knot'ko, V. B., Murzinov, I. N., Rumynskij, A. N., Kuz'min, L. A., "Vysokochastotnyj plazmotron – ustanovka dlja issledovanij ajerofizicheskikh problem s ispol'zovaniem vysokojental'pinyh gazovyh potokov," *Kosmonavtika i raketostroenie*, No. 2, 1994, pp. 22–32.
3. Zhestkov, B. E., "Issledovanie termohimicheskoy ustojchivosti teplozashhitnyh materialov," *Uchenye zapiski CAGI*, Vol. XLV, No. 5, 2014, pp. 62–77.
4. Chazot, O., Krassilchikoff, H. V., Thomel, J., "TPS Ground Testing in Plasma Wind Tunnel for Catalytic Properties Determination," *46<sup>th</sup> AIAA Aerospace Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 2008-1252, Jan. 2008. <https://doi.org/10.2514/6.2008-1252>
5. Herdrich, G., Auweter-Kurtz, M., Kurtz, H., Laux, T., Winter, M., "Operational Behavior of Inductively Heated Plasma Source IPG-3 for Entry Simulations," *J. Thermophys. Heat Trans.*, Vol. 16, No. 3, 2002. <https://doi.org/10.2514/2.6698>
6. Bourdon, A., Bultel, A., Desportes, A., van Ootegem, B., Vervisch, P., "Catalycity Studies of TPS in a 90kW Plasmatron at CORIA," *Presented at the 2<sup>nd</sup> International Symposium "Atmospheric Reentry Vehicles and Systems"*, Arcachon (France), March 26–29, 2001.
7. Fletcher, D. G., Meyers, J. M., "Surface Catalyzed Reaction Efficiencies in Oxygen Plasmas from Laser Induced Fluorescence Measurements," *J. Thermophys. Heat Trans.*, Vol. 31, No. 2, 2017, pp. 410–420. <https://doi.org/10.2514/1.T4923>
8. Kolesnikov, A. F., "Uslovija modelirovanija v dozvukovyh techenijah teploperedachi ot vysokojental'pijnogo potoka k kriticheskoj tochke zatuplennogo tela," *Izv. RAN MZhG*, No. 1. 1993, pp. 172–180.
9. Kolesnikov, A. F., "The Concept of Local Simulation for Stagnation Point Heat Transfer in Hypersonic Flows: Applications and Validation," *21st Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, AIAA Paper 2000-2515, 2000. <https://doi.org/10.2514/6.2000-2515>
10. Kolesnikov, A. F., "Uslovija lokal'nogo podobija termohimicheskogo vzaimodejstvija vysokojental'pinyh potokov gazov s nerazrushaemoj poverhnost'ju," *TVT*, Vol. 52, No. 1, 2014, pp. 118–125. <https://doi.org/10.7868/S004036441306015X>
11. Kolesnikov, A. F., Gordeev, A. N., Vasil'evskij, S. A., "Modelirovanie nagreva v kriticheskoj tochke i opredelenie kataliticheskoj aktivnosti poverhnosti dlja spuskaemogo apparata «EXPERT»," *Fiziko-himicheskaja kinetika v gazovoj dinamike*, Vol. 9, 2010. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/123/>
12. Kolesnikov, A. F., Gordeev, A. N., Vasil'evskij, S. A., Tepteeva, E. S., "Vlijanie geometrii razrjadnogo kanala VCh-plazmotrona na teploobmen v vysokojental'pinyh dozvukovyh strujah vozduha," *TVT*, Vol. 57, No. 4, 2019, pp. 509–517. <https://doi.org/10.1134/S0040364419040112>
13. Vasil'evskij, S. A., Kolesnikov, A. F., *Chislennoe issledovanie techenij i teploobmena v indukcionnoj plazme vysokochastotnogo plazmotrona* (Numerical study of flows and heat transfer in the induction plasma of a high-frequency plasmatron), *Jenciklopedija nizkotemperaturnoj plazmy* (Encyclopedia of low-temperature plasma. Series B), Vol. VII-1, No. 2, M., izd-vo Janus-K., 2008, pp. 220–234.
14. Petuhov, I. V., *Chislennyj raschet dvumernyh techenij v pogranichnom sloe* (Numerical calculation of two-dimensional flows in the boundary layer), V sb. «Chislennye metody reshenija differencial'nyh i integral'nyh uravnenij i kvadraturnye formuly» ("Numerical methods for solving differential and integral equations and quadrature formulas»), M.: Nauka, 1964, pp. 304–325.
15. 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, pp. 323–328.
16. Saharov, V. I., "Chislennoe modelirovanie termicheski i himicheski neravnovesnyh techenij i teploobmena v nedorasshirenyh strujah indukcionnogo plazmotorona," *Izv. RAN MZhG*, No. 6, 2007, pp. 157–168.

17. *Termodinamicheskie svojstva individual'nyh veshhestv. Spravochnoe izdanie* (Thermodynamic properties of individual substances. Reference book), M.: Nauka, Vol. 1, No. 1, 1978, 495 p; Vol. 1, No. 2, 327 p.
18. Ibragimova, L. B., Smehov, G. D., Shatalov, O. P., “Konstanty skorosti dissociacii dvuhatomnyh molekul v termicheski ravnovesnyh uslovijah,” *Izv. RAN MZhG*, No. 1, 1999, pp. 181–186.
19. Losev, S. A., Makarov, V. N., Pogosbekjan, M. Ju., “Model' fiziko-himicheskoj kinetiki za frontom ochen' sil'noj udarnoj volny v vozduhe,” *Izv. RAN MZhG*, No. 2, 1995, pp. 169–182.  
<https://doi.org/10.1007/BF02029844>
20. Park, C., Howe, J. T., Jaffe, R. L., Candler, G. V., “Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions. II: Mars Entries,” *Journal Thermophys. Heat Trans.*, Vol. 8, No. 1, 1994, pp. 9–23.  
<https://doi.org/10.2514/3.496>
21. 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>
22. Girshfelder, Jos., Curtiss, Ch., Bird, R. *Molekuljarnaja teorija gazov i zhidkostej* (Molecular Theory of Gases and Liquids), M.: Izd-vo inostr. lit., 1961, 929 p.
23. Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Sherwood, T. K., *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, N. Y.: 1977, 688 p.
24. 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.
25. Gordeev, O. A., Kalinin, A. P., Komov, A. L., Ljusternik, V. E., Samujlov, E. V., *Obzory po teplofizicheskim svojstvam veshhestv* (Reviews on thermophysical properties of substances), TFC-M: IVTAN, Vol. 55, No. 5, 1985, 100 p.
26. Kolesnikov, A. F., Saharov, V. I., “Podobie teploobmena modeli v nedorasshirenyh strujah dissocirovannogo vozduha v VCh-plazmotrone i pri obtekanii sfery vysokoskorostnym potokom v atmosphere,” *Izv. RAN MZhG*, No. 3, 2016, pp. 110–116. <https://doi.org/10.7868/S0568528116030099>
27. Lunev, V. V., *Giperzvukovaja ajerodinamika* (Hypersonic aerodynamics). M.: Mashinostroenie, 1975, 328 p.
28. Kolesnikov, A. F., Jakushin, M. I., “Uslovija modelirovanija konvektivnogo teploobmena tel s giperzvukovymi potokami na indukcionnyh plazmotronah,” *TVT*, Vol. 26, No. 4, 1988, pp. 742–750.

Статья поступила в редакцию 6 марта 2021 г.