

Heat Exchange of Dissociated Air Jets with the Surface of Heat-Protective Materials SiO₂ and SiC

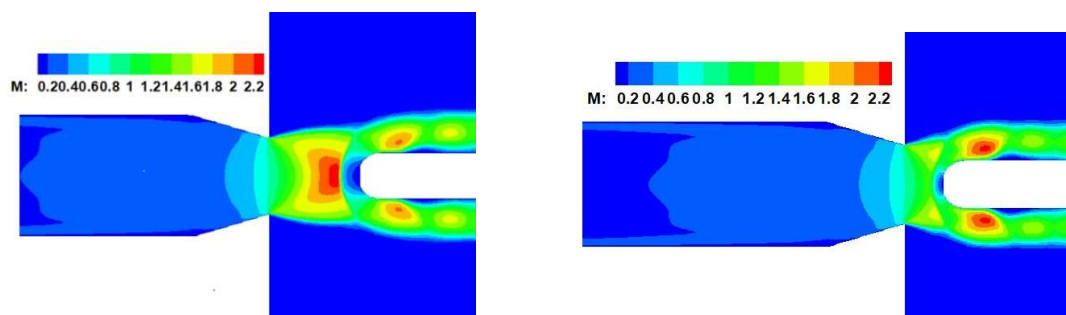
V. I. Sakharov

*Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia
sakharov@imec.msu.ru*

Abstract

Heat transfer of a water-cooled cylindrical model with a rounded edge and a flat blunt nose in underexpanded jets of dissociated air is considered during numerical simulation of the flow past it using the Navier-Stokes equations with multicomponent nonequilibrium dissociated air, taking into account chemical reactions in the flow and on the surface. The studies were conducted in underexpanded jets of high-enthalpy air flowing from a water-cooled conical plasma torch nozzle with an exit cross-section diameter of 50 mm at a submerged pressure of 8.5 hPa, an air flow rate of 3.6 g/s, and an anode supply power of the plasma torch RF generator of 64 kW. Heat transfer was calculated with a flat heat-absorbing surface made of SiO₂ and SiC in the model nose. The distance between the forward stagnation point of the models and the nozzle exit section varied from 25 mm to 60 mm. Satisfactory agreement was obtained between the calculated heat flux densities at the stagnation point for an effective heterogeneous recombination coefficient of $\gamma_w=0.005$ (in the Goulard model) and for a fixed $S_0=10^{14}$ (the number of adsorption sites per unit surface area in the model of stepwise heterogeneous kinetics of the interaction of dissociated air with SiO₂ and SiC surfaces). Both models use one free parameter.

Keywords: dissociated air, heterogeneous catalysis, heat transfer, RF plasmatron, β -cristobalite, silicon carbide, adsorption site density.



Computational domain of the numerical simulation of the flow around a model with a flat sensor in a plasma torch, at various locations in an underexpanded jet. The color shows the local Mach number distribution

УДК (539.196+541.127+ 533.6.011.8)

Теплообмен струй диссоциированного воздуха с поверхностью теплозащитных материалов SiO₂ и SiC

В. И. Сахаров

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект д. 1*

sakharov@imec.msu.ru

Аннотация

Рассмотрен теплообмен водоохлаждаемой цилиндрической модели диаметром 20 мм со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части в недорасширенных струях диссоциированного воздуха при численном моделировании ее обтекания в рамках уравнений Навье – Стокса многокомпонентным неравновесно диссоциированным воздухом с учетом химических реакций в потоке и на поверхности. Исследования проводились в недорасширенных струях высокоэнтальпийного воздуха, истекающих из водоохлаждаемого конического сопла плазматрона с диаметром выходного сечения 50 мм при давлении в затопленном пространстве 8.5 гПа, расходе воздуха 3.6 г/с и мощности ВЧ-генератора плазматрона по анодному питанию 64 кВт. Теплообмен рассчитывался с плоской теплопринимающей поверхностью из SiO₂ и SiC в носовой части модели. Расстояние между передней критической точкой моделей и срезом сопла варьировалось в пределах от 25 мм до 60 мм. Получено удовлетворительное согласие расчетных данных по плотностям тепловых потоков в точке торможения при эффективном коэффициенте гетерогенной рекомбинации $\gamma_w = 0.005$ (в модели Гуларда) и при фиксированном $S_0 = 10^{14}$ (количестве мест адсорбции на единицу площади поверхности в модели постадийной гетерогенной кинетики взаимодействия диссоциированного воздуха с поверхностями из SiO₂ и SiC). В обеих моделях используется по одному свободному параметру.

Ключевые слова: диссоциированный воздух, гетерогенный катализ, теплообмен, ВЧ-плазматрон, β -кристобалит, карбид кремния, плотность адсорбционных центров.

1. Введение

Цель данной работы заключается в численном исследовании теплообмена водоохлаждаемой модели со сверхзвуковыми струями диссоциированного воздуха для условий, реализуемых на ВЧ-плазматроне ВГУ-4 (ИПмех РАН). Тепловые потоки рассчитывались в окрестности критической точки водоохлаждаемой цилиндрической модели диаметром 20 мм со скругленной кромкой и плоским притуплением носовой части при использовании различных граничных условий на поверхности плоского датчика из SiO₂ и SiC.

Для расчетов теплообмена при обтекании модели необходимо провести численное моделирование течения в разрядном канале ВЧ-плазматрона и обтекания модели истекающими из него сверхзвуковыми недорасширенными струями.

В представленной работе рассматривается задача обтекания медной водоохлаждаемой цилиндрической модели с плоскими датчиками из теплозащитных материалов в носовой части на основе β -кристобалита и карбида кремния в условиях, соответствующих экспериментам, проводимым на ВЧ-плазматроне ВГУ-4 [1].

Данный плазмотрон на протяжении многих лет успешно применяется для исследования тепловой нагрузки на поверхность различных материалов в сверхзвуковых потоках высокоэнтальпийных диссоциированных газов [2–4]. Для анализа и интерпретации экспериментальных данных был разработан программный комплекс NIGHTEMP, способный совместно рассчитывать течение диссоциированных и частично ионизированных газовых смесей во всех областях плазмотрона, начиная от разрядного канала с индукционным нагревом газов и заканчивая обтеканием моделей в рабочей зоне с образцами исследуемых материалов [5,6].

Эта задача была решена в работе на основе численного моделирования в рамках уравнений Навье – Стокса течения диссоциированного воздуха в ВЧ-плазмотроне с использованием ранее полученной авторами полных моделей гетерогенного катализа на поверхности β -кристобалита и карбида кремния [16].

2. Постановка задачи численного моделирования обтекания тела в ВЧ-плазмотроне

Численный расчет течений проводился с использованием программного комплекса NIGHTEMP [5,6], основанного на интегрировании полных уравнений Навье – Стокса на многоблочной структурированной криволинейной сетке с использованием метода конечных объемов и предназначенного для расчета внешних и внутренних течений.

Рассматривалось течение частично диссоциированного и ионизированного химически неравновесного воздуха, состоящего из следующих компонентов: O, O⁺, N, N⁺, O₂, O₂⁺, N₂, N₂⁺, NO, NO⁺, e⁻. Система газозависимых химических реакций и соответствующие им константы скоростей реакций были взяты из работы [7, 8]. Термодинамические и термохимические данные для рассматриваемых компонентов брались из [9]. Коэффициенты вязкости, теплопроводности и многокомпонентной диффузии рассчитывались с использованием приближенных формул в работах [10, 11]. Схема расчетной области, моделирующей течение в плазмотроне, представлена на рис. 1, где в качестве иллюстрации показаны распределения локального числа Маха, полученные в расчетах.

3. Граничные условия на каталитической поверхности в задаче обтекания тела

При решении задачи граничными условиями для диффузионных потоков атомарных и молекулярных компонентов на торцевой поверхности модели использовались следующие соотношения:

- Для модели Гуларда [12]

$$J_A = -\frac{2\gamma_w}{2-\gamma_w} \cdot \sqrt{\frac{kT_w}{2\pi m_A}} \cdot \frac{\rho_A \cdot c_A}{m_A}, \quad J_{A_2} = -0.5 \cdot J_A$$

Принималось, что поверхность модели имеет заданную температуру T_w и характеризуется эффективным коэффициентом каталитической рекомбинации атомов γ_w , m_A – молекулярный вес атомарной компоненты; C_A – массовая концентрация атомарной компоненты; k – постоянная Больцмана; ρ_A – поверхностная плотность воздушной смеси.

- Для модели постадийной гетерогенной кинетики выражения, приведенные в [13, 14].

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 ионизированной смеси газа с использованием условий квазинейтральности смеси [15]. Термодиффузией пренебрегалось. Для вычисления коэффициентов вязкости и теплопроводности газовой смеси использовались приближенные формулы Уилки – Васильевой [17].

Индуктор при расчетах переменного электрического поля в плазмотроне заменялся пятью бесконечно тонкими кольцевыми витками. Расчет высокочастотного вихревого электрического поля выполнялся на основе локально одномерного приближения, так как изменение электрического поля в осевом направлении пренебрежимо мало по сравнению с его изменением в радиальном направлении. При совместном расчете течения воздушной плазмы и электромагнитного поля в разрядном канале плазмотрона в качестве определяющего параметра задавалась также мощность, вкладываемая в разряд, а соответствующий ток в индукторе определялся в процессе решения. Значение мощности, в свою очередь, определялось с помощью калориметрических измерений выносимой мощности из разрядного канала плазмотрона. Полная постановка электромагнитной части задачи приведена в [18].

4. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 изображены рассчитанные числа Маха при обтекании модели, расположенной в недорасширенной струе, истекающей из конического сопла плазмотрона и расположенной на расстояниях 20 мм и 60 мм от среза сопла соответственно.

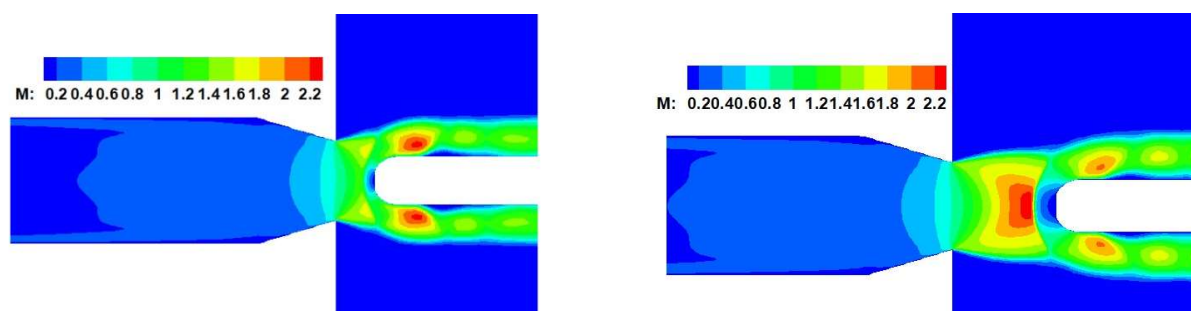


Рис. 1. Расчетные области численного моделирования обтекания модели с плоским датчиком в плазмотроне, при различных расположениях ее в недорасширенной струе. Цветом показаны распределения локального числа Маха

При больших расстояниях между соплом и носовой частью модели ее обтекание происходит с образованием головной ударной волны. При уменьшении расстояния между носовой частью и выходом струи из сопла сверхзвуковой поток перестраивается и происходит образование сверхзвуковых зон около боковой поверхности модели.

Как показывает анализ данных, представленных в таблице 1 и на рис. 2, значения, как полных тепловых потоков, так и потоков за счет теплопроводности к плоскому датчику в носовой части практически одинаковы для материалов из SiO_2 и SiC .

Таблица 1

$X, \text{ мм}$	SiO_2		SiC		$\gamma = 0.005$	
	Q_w	$\lambda \partial T / \partial n$	Q_w	$\lambda \partial T / \partial n$	Q_w	$\lambda \partial T / \partial n$
25	179.79	157.76	179.83	159.87	179.83	159.87
30	172.12	155.64	171.99	151.90	172.11	153.75
35	161.92	146.90	161.57	143.10	161.91	145.15
40	148.78	135.12	147.93	134.00	148.70	135.84
45	133.43	120.64	135.29	119.94	135.07	120.64
50	120.56	108.53	120.47	105.67	120.22	106.62
55	107.27	95.60	106.64	92.28	107.45	95.03
60	93.79	82.83	93.31	80.04	93.34	81.80

Подбирая параметр γ в модели Гуларда, можно добиться хорошего согласия расчетных значений тепловых потоков с моделью постадийной гетерогенной кинетики для этих материалов.

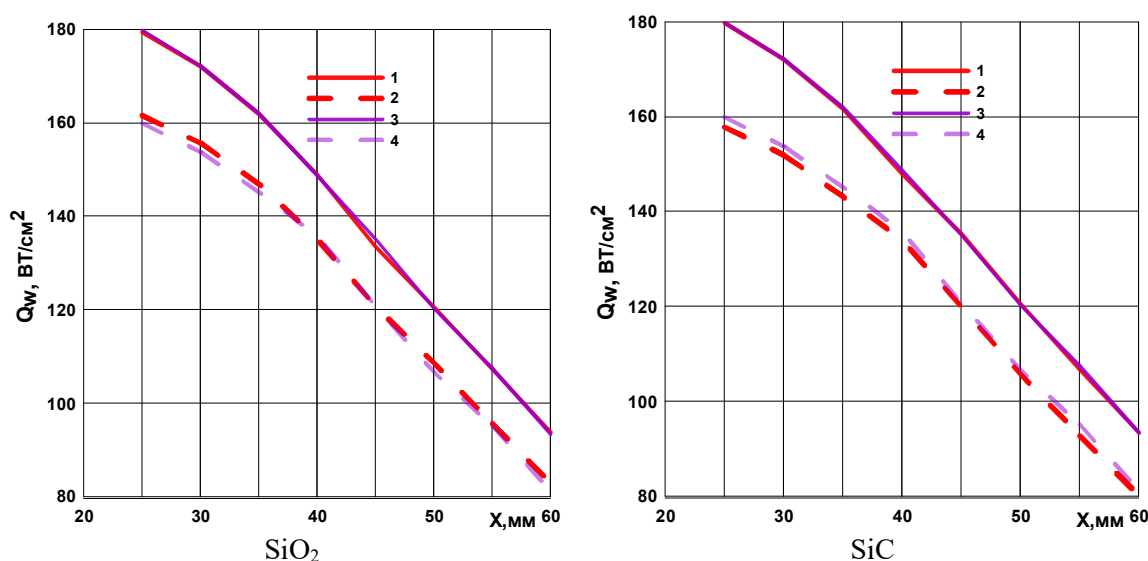


Рис. 2. Зависимости тепловых потоков к поверхностям SiO_2 и SiC в носовой части от расстояния X до среза сопла. 1 и 3 – полные тепловые потоки к теплозащитным материалам в расчетах по модели диффузии Гуларда и модели гетерогенного катализа соответственно; 2 и 4 – тепловые потоки за счет теплопроводности соответственно

5. Заключение

В работе представлены результаты численного моделирования обтекания цилиндрических моделей с образцами теплозащитных покрытий на основе β -кристобалита и карбида кремния в носовой части для различных их расположений в недорасширенной сверхзвуковой струе высокоэнтальпийного воздуха, соответствующими условиям работы индукционного ВЧ-плазмотрона.

Расчеты выполнены в рамках уравнений Навье – Стокса на многоблочной расчетной сетке для течения многокомпонентного химически реагирующего газа. В качестве граничных условий на обтекаемой поверхности использована модель Гуларда для диффузионных потоков и ранее разработанная авторами постадийная модель гетерогенного катализа на основе квантово-механического подхода.

Показан вклад процессов диффузии и теплопроводности в тепловой поток к поверхностям для различных режимов взаимодействия газа с материалами поверхности.

Получено, что оба материала близки по этому параметру. Рассчитанные тепловые потоки не зависят от используемых моделей граничных условий для всех расположений моделей в сверхзвуковой струе.

Благодарности и ссылки на гранты

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

Литература

1. Гордеев А. Н., Колесников А. Ф. Высоочастотные индукционные плазмотроны серии ВГУ. В сб. Актуальные проблемы механики: Физико-химическая механика жидкостей и газов. Москва: Наука, 2010. С. 151–177.

2. Колесников А. Ф., Сахаров В. И. Подобие теплообмена модели в недорасширенных струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазматроне и при обтекании сферы высокоскоростным потоком в земной атмосфере // Изв. РАН МЖГ. 2016. № 3. С. 110–116.
3. Сахаров В. И. Численное моделирование течений в индукционном высокочастотном плазматроне и теплообмена в недорасширенных струях воздуха // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2007. № 3. С. 61–64.
4. Гордеев А. Н., Колесников А. Ф., Сахаров В. И. Течение и теплообмен в недорасширенных неравновесных струях индукционного плазматрона // Изв. РАН МЖГ. 2011. № 4. С. 130–142.
5. Сахаров В. И. Численное моделирование термически и химически неравновесных течений и теплообмена в недорасширенных струях индукционного плазматрона // Изв. РАН МЖГ. № 6. 2007. № 6. С. 157–168.
6. 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, 2004. Pp. 323–328.
7. Losev S. A. et al. Thermochemical nonequilibrium kinetic models in strong shock waves on air // 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994.
8. Лосев С. А., Макаров В. Н., Погосбемян М. Ю. Модель физико-химической кинетики за фронтом очень сильной ударной волны в воздухе // Известия РАН. МЖГ. 1995. № 2. С. 169–182.
9. Gurvich L. V., Veys I. V., Alcock C. B. Thermodynamic Properties of Individual Substances. Begell House Inc., 1994. 716 с.
10. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K. The Properties of Gases and Liquids. New York: McGraw-Hill, 1977. 688 p.
11. Park C. et al. Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions. II - Mars entries // J. Thermophys. Heat Transf. 1994. Vol. 8, № 1. Pp. 9–23.
12. Goulard R. On Catalytic Recombination Rates in Hypersonic Stagnation Heat Transfer // J. Jet Propuls 1958. Vol. 28, № 11. Pp. 737–745.
13. Крупнов А. А., Погосбемян М. Ю., Сахаров В. И. Разработка и применение моделей катализа в задачах высокоскоростного обтекания затупленных тел потоком диссоциированного воздуха // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2024. Том 25, вып. 6. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2024-25-6/articles/1161>
14. Крупнов А. А., Погосбемян М. Ю., Сахаров В. И. Применение моделей гетерогенного катализа при решении задач струйного обтекания моделей из меди для условий экспериментов на индукционном ВЧ-плазматроне // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Том 24, вып. 4. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2023-24-4/articles/1060/>
15. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 929 с.
16. Крупнов А. А., Погосбемян М. Ю., Сахаров В. И. Взаимодействие диссоциированного воздуха с поверхностью теплозащитных материалов SiO₂ и SiC для условий экспериментов в ВЧ-плазматроне // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Том 26, вып. 7. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2025-26-7/articles/1219/>
17. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K. The Properties of Gases and Liquids, McGraw-Hill, N.Y.: 1977. 688 p.
18. Колесников А. Ф. Численное моделирование течений равновесной индукционной плазмы в цилиндрическом канале плазматрона // Известия РАН. МЖГ. 2000. № 5. С. 164–173.

References

1. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., High-Frequency Induction Plasmatoms of the VGU Series, *Topical Problems in Mechanics. Physico-Chemical Mechanics of Liquids and Gases*, Moscow: Nauka, 2010, pp. 151–177 [in Russian].
2. Kolesnikov A. F., Sakharov V. I., Similarity between the Heat Transfer to a Model in an Underexpanded Dissociated-Air Jet of a High-Frequency Plasmatron and to a Sphere in a High-Velocity Flow in the Terrestrial Atmosphere, *Fluid Dynamics*, 2016, no. 3. DOI: 10.1134/S0015462816030121
3. Sakharov V. I., Numerical modeling of flows in an induction high-frequency plasma torch and heat transfer in underexpanded air jets, *Bulletin of Moscow University. Series I: Mathematics. Mechanics*, Publishing House of Moscow University Press (M.), 2007, no. 3, pp. 61–64.
4. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., Sakharov V. I., Flow and heat transfer in underexpanded nonequilibrium jets of an induction plasma torch, *Fluid Dynamic*, 2011, vol. 46, no. 4. pp. 623–633. DOI: 10.1134/S0015462811040120
5. Sakharov V. I., Numerical simulation of thermally and chemically nonequilibrium flows and heat transfer in underexpanded jets of an induction plasmatron, *Fluid Dynamic*, 2007, vol. 42, pp. 1007–1016. DOI: 10.1134/S0015462807060166
6. Afonina N. E., Gromov V. G., Sakharov V. I., HIGHTEMP Technique of High Temperature Gas Flows Numerical Simulation, Proc. 5th Europ. Symp. on Aerothermodyn. Space Vehicles. Cologne, 2004. pp. 323–328.
7. Losev S. A. et al., Thermochemical nonequilibrium kinetic models in strong shock waves on air, 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994.
8. Losev S. A., Makarov V. N., Pogosbekyan M. Yu., Model of physicochemical kinetics behind the front of a very strong shock wave in air, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Liquids and Gases*, 1995, no. 2, pp. 169–182.
9. Gurvich L. V., Veyts I. V., Alcock C. B., *Thermodynamic Properties of Individual Substances*, Begell House Inc., 1994, 716 p.
10. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K., *The Properties of Gases and Liquids*, New York: McGraw-Hill, 1977, 688 p.
11. Park C. et al., Review of chemical-kinetic problems of future NASA missions, II: Mars entries, *J. Thermophys. Heat Transf.*, 1994, vol. 8, no. 1, pp. 9–23. DOI: 10.2514/3.496
12. Goulard R., On Catalytic Recombination Rates in Hypersonic Stagnation Heat Transfer, *J. Jet Propuls.*, 1958, vol. 28, no. 11, pp. 737–745. DOI: 10.2514/8.7444
13. Krupnov A. A., Pogosbekyan M. Yu., Sakharov V. I., Development and application of catalysis models in problems of high-speed flow of dissociated air around blunt bodies, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2024, vol. 25, iss. 6 [in Russian]. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2024-25-6/articles/1161>
14. Krupnov A. A., Pogosbekyan M. Yu., Sakharov V. I., Application of heterogeneous catalysis models in solving problems of jet flow around copper models for experimental conditions on an induction RF plasma torch, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, iss. 4 [in Russian]. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2023-24-4/articles/1060/>
15. Hirschfelder J. O., Curtiss C. F., Bird R. B., *The Molecular Theory of Gases and Liquids*, New York: John Wiley and Sons, 1954. 1219 p.
16. Kroupnov A. A., Pogosbekian M. Ju., Sakharov V. I., Interaction of dissociated air with the surface of thermal protection materials SiO₂ and SiC for experimental conditions in a HF plasmatron, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2025, vol. 26, iss. 7 [in Russian]. <http://chemphys.ipmnet.ru/issues/2025-26-7/articles/1219>

17. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K., *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, N.Y.: 1977. 688 p.
18. Vasilievsky S. A. Kolesnikov A. F., Numerical simulation of equilibrium induction plasma flows in a cylindrical plasma torch channel, *Fluid Dynamic*, 2000, vol. 35, iss. 5, pp. 769–777.
DOI: 10.1023/A:1026659419493

Статья поступила в редакцию 24 апреля 2026 г.