

Heat Fluxes at a Cylindrical Copper Model Surface in Supersonic Underexpanded Jets of Dissociated Air for Experimental Conditions on the Induction Plasma Torch VGU-4 with Different Models of Boundary Conditions at the Surface

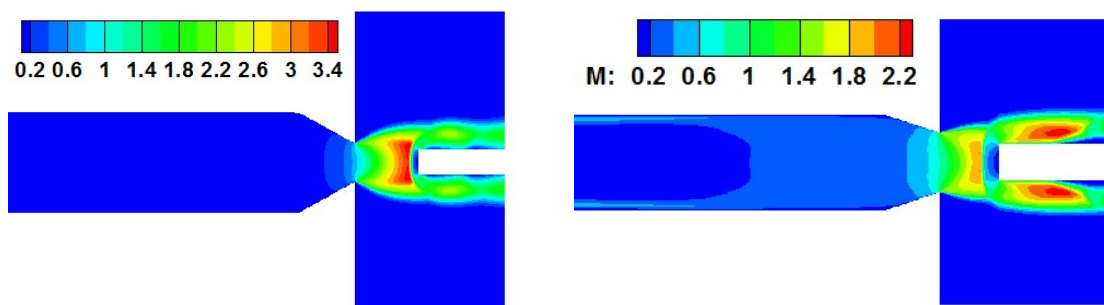
V. I. Sakharov

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

Abstract

The objective of this work is to perform a computational study of heat transfer between copper water-cooled models with a flat end in the nose section with supersonic jets of dissociated air for conditions realized in experiments on the VGU-4 RF plasma torch (IPM RAS) when working with conical nozzles with outlet section diameters of 30, 40 and 50 mm in the range of air flow rates supplied to the discharge channel of $2.4 \div 4.8$ g/s and to compare these calculated data with experimental values. For the experimental conditions, a numerical simulation of the flow around the models was performed within the framework of the Navier-Stokes equations for multicomponent nonequilibrium dissociated air taking into account chemical reactions in the flow and on the cold surface for various boundary conditions on their surfaces (the Goulard model and the model of stage-by-stage heterogeneous kinetics of the interaction of dissociated air with the copper surface). Both models use one free parameter, the variation of which allows obtaining heat flux densities in the vicinity of the stagnation point identical to the experimental values, although in the second model this parameter, unlike the first, has a clear physical meaning. From the calculations, the values of these parameters were obtained for two copper water-cooled cylindrical models with a diameter of 20 mm and 30 mm with a flat end in the nose section at different distances between the front stagnation point of the models and the nozzle section, which varied in the range from 25 mm to 50 mm.

Keywords: dissociated air, heterogeneous catalysis, heat transfer, HF-plasmatron, Navier–Stokes equations.



$D_s = 30$ mm; $P = 6.2$ hPa; $W = 64$ kW; $G = 4.8$ g/s $D_s = 50$ mm; $P = 8.5$ hPa; $W = 64$ kW; $G = 3.6$ g/s

Computational domain of numerical simulation of flow around a model with a flat sensor in a plasmatron. Color shows the distributions of local Mach number

УДК 533.6.011.8

Тепловые потоки к поверхности цилиндрической модели из меди в сверхзвуковых недорасширенных струях диссоциированного воздуха для условий экспериментов на индукционном плазмотроне ВГУ-4 с различными моделями граничных условий на поверхности

В. И. Сахаров

*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект д. 1
sakharov@imec.msu.ru*

Аннотация

Цель данной работы заключается в расчетном исследовании теплообмена медных водоохлаждаемых моделей с плоским торцом в носовой части со сверхзвуковыми струями диссоциированного воздуха для условий, реализуемых в экспериментах на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) при работе с коническими соплами с диаметрами выходных сечений 30, 40 и 50 мм в диапазоне расхода подаваемого воздуха в разрядный канал $2.4 \div 4.8$ г/с и в сравнении этих расчетных данных с экспериментальными значениями. Для условий экспериментов выполнено численное моделирование обтекания моделей в рамках уравнений Навье–Стокса для многокомпонентного неравновесно диссоциированного воздуха с учетом химических реакций в потоке и на холодной поверхности для различных граничных условий на их поверхностях (модели Гуларда и модели постадийной гетерогенной кинетики взаимодействия диссоциированного воздуха с поверхностью меди). В обеих моделях используется по одному свободному параметру, вариация которых позволяет получить плотности тепловых потоков в окрестности точки торможения одинаковые с экспериментальными значениями, хотя во второй модели этот параметр, в отличие от первой, имеет ясный физический смысл. Из расчетов получены значения этих параметров для двух медных водоохлаждаемых цилиндрических моделей диаметром 20 мм и 30 мм с плоским торцом в носовой части при различных расстояниях между передней критической точкой моделей и срезом сопла, которое варьировалось в диапазоне от 25 мм до 50 мм.

Ключевые слова: диссоциированный воздух, гетерогенный катализ, теплообмен, ВЧ-плазмотрон, уравнения Навье – Стокса.

1. Введение

Индукционные ВЧ-плазмтроны 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-плазмтронов заключаются в том, что они позволяют в непрерывном режиме работы получать до- и сверхзвуковые потоки чи-

стой низкотемпературной плазмы с высокой стабильностью и хорошей воспроизводимостью. Хотя в лабораторных высокоэнтальпийных установках невозможно полностью моделировать натурные условия аэродинамического нагрева поверхности тела при входе в атмосферу, однако возможно локальное моделирование условий теплопередачи от пограничного слоя к критической точке на поверхности [1–4]. Данная работа дополняет цикл публикаций [5–7], затрагивающих вопросы теплообмена медных образцов в сверхзвуковых струях диссоциированного воздуха.

Атомы и молекулы газа, находящиеся около поверхности твердого тела, всегда тем или иным способом с ней взаимодействуют. Проходят процессы адсорбции и десорбции, поверхностной рекомбинации и диссоциации, возбуждения и релаксации внутренних степеней свободы в результате столкновений с поверхностными структурными элементами. Наиболее ярко и существенно влияние этих гетерогенных процессов проявляется при входе многократных космических аппаратов в атмосферу Земли, когда конвективные тепловые потоки к их поверхности в носовой части возрастают в несколько раз. Поэтому при численном моделировании течения многокомпонентного газа, как в плазматронах, так и около высокоскоростных аппаратов для условий больших и средних высот полета в атмосфере, необходимо ставить, как модельные, так и физически обоснованные граничные условия, учитывающие основные гетерогенные процессы, протекающие на поверхности теплозащитного покрытия, например, модели поэтапной гетерогенной кинетики взаимодействия диссоциированного воздуха с поверхностью [9].

2. Применение моделей катализа в расчетах обтекания медных моделей, и сравнение тепловых потоков с экспериментальными значениями

Эксперименты по теплообмену проводились в Институте проблем механики РАН имени А. Ю. Ишлинского на 100-киловаттном высокочастотном индукционном плазматроне ВГУ-4 [6].

Теплообмен в недорасширенных струях диссоциированного воздуха исследовался на медных водоохлаждаемых цилиндрических моделях диаметром 20 мм и 30 мм с плоским торцом. Тепловые потоки в носовой части моделей измерялись проточными стационарными калориметрами с плоской тепловоспринимающей поверхностью из меди. В экспериментах измерения проводились в недорасширенных струях высокоэнтальпийного воздуха, истекающих из водоохлаждаемых конических сопел с диаметрами выходных сечений 30 мм, 40 мм и 50 мм, при давлениях в затопленном пространстве в диапазоне от 8.5 гПа до 12 гПа, при расходах воздуха, подаваемого в разрядный канал, от 2.4 до 3.6 г/с и мощностях ВЧ-генератора плазматрона по анодному питанию в диапазоне от 45 кВт до 64 кВт.

Для этих условий выполнено численное моделирование обтекания моделей в рамках уравнений Навье – Стокса для многокомпонентного неравновесно диссоциированного воздуха с учетом химических реакций в потоке и на холодной поверхности при температуре поверхности моделей 300 К.

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

- для модели Гуларда [8]

$$J_A = -\frac{2\gamma}{2-\gamma} \cdot \left(\frac{kT_w}{2\pi m_A} \right) \cdot \frac{\rho \cdot c_A}{m_A}, \quad J_{A_2} = -0.5 \cdot J_A;$$

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

- для модели постадийной гетерогенной кинетики выражения, приведенные в [9, 10].

В численных расчетах применялась технология, основанная на комплексе программ численного интегрирования уравнений Навье – Стокса [7, 11] методом конечного объема 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, O₂, N₂, NO, O⁺, N⁺, NO⁺, O₂⁺, N₂⁺ и e⁻. Термодинамические и термохимические данные для рассматриваемых компонентов брались из [12]. Числовые значения констант химических реакций, протекающих в высокотемпературной воздушной смеси, заимствованы из [13–16]. 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 [17]. Термодиффузией пренебрегалось. Для вычисления коэффициентов вязкости и теплопроводности газовой смеси использовались приближенные формулы Уилки – Васильевой [18].

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, в свою очередь, определялось с помощью калориметрических измерений выносимой мощности из разрядного канала плазмотрона. Полная постановка электромагнитной части задачи приведена в [19].

В таблицах 1–5 приведены значения плотностей полных тепловых потоков и его частей за счет теплопроводности, а также осредненные значения давлений торможения в окрестности критической точки для модели постадийной гетерогенной кинетики (столбцы 2–4), экспериментальные значения (столбцы 5–6) [5–7] и модели Гуларда (последние три столбца) для различных расстояний модели от среза сопла (первый столбец). Все расчеты с использованием модели Гуларда проведены для значения параметра $\gamma = 0.1$, а для модели постадийной гетерогенной кинетики при $S_0 = 4.14 \cdot 10^{15}$, как отвечающие лучшему совпадению расчетных и экспериментальных значений по теплообмену.

Таблица 1

Сравнение тепловых потоков для расчетов и экспериментов для выходного сечения сопла $D_s = 40$ мм, диаметра модели $d_m = 20$ мм, давлений в барокамере 6.3 гПа, расходе воздуха $G = 2.4$ г/с, мощности ВЧ-генератора $W = 45$ кВт. X – расстояние от среза сопла до модели

X , см	Расчет ($S_0 = 4.14 \cdot 10^{15}$)			Эксперимент		Расчет ($\gamma = 0.1$)		
	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w	Q_w	P_w	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w
	Вт/см ²		гПа	Вт/см ²	гПа	Вт/см ²		гПа
30	311.49	126.79	27.37	312.08	27.95	315.89	129.65	27.39
40	254.64	104.81	20.21	255.85	20.75	258.57	114.78	20.37
50	202.12	83.76	15.86	200.87	16.3	202.31	89.55	15.88

Таблица 2

Сравнение тепловых потоков для расчетов и эксперимента для выходного сечения сопла $D_s = 40$ мм, диаметра модели $d_M = 20$ мм, давления в барокамере 8.3 гПа, расходе воздуха $G = 2.4$ г/с, мощности ВЧ-генератора $W = 45$ кВт. X – расстояние от среза сопла до модели

$X, \text{ см}$	Расчет ($S_0 = 4.14 \cdot 10^5$)			Эксперимент		Расчет ($\gamma = 0.1$)		
	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w	Q_w	P_w	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w
	Вт/см ²		гПа	Вт/см ²	гПа	Вт/см ²		гПа
25	325.44	134.37	31.95	325	32.4	335.34	146.93	31.95
30	308.79	135.74	28.61	302.08	29.16	308.81	135.88	28.62
35	271.69	123.17	25.62	274.	25.3	274.66	111.15	25.3
40	239.71	98.32	23.27	245.0	23.3	244.44	109.27	23.3
45	202.71	83.58	21.56	209.0	22.0	210.61	94.38	21.54
50	165.19	68.94	20.67	172.48	21.3	173.71	78.13	20.57

Как отмечено в работах [4–7], в которых тепловые потоки к моделям с торцевыми затуплениями измерялись с точностью до 5 %, как в сторону их завышения, так и занижения. Отметим, что значения давления, измеренные в точке торможения торцевого затупления, для всех рассмотренных вариантов, представленных в таблицах 1–5, хорошо согласуются с расчетными значениями для двух моделей граничных условий, а тепловые потоки за счет теплопроводности к моделям могут различаться при постановке различных граничных условий из-за перераспределения их в диффузионную составляющую.

Таблица 3

Сравнение тепловых потоков для расчетов и эксперимента для выходного сечения сопла $D_s = 30$ мм, диаметра модели $d_M = 20$ мм, давления в барокамере 6.2 гПа, расходе воздуха $G = 2.4$ г/с, мощности ВЧ-генератора $W = 64$ кВт. X – расстояние от среза сопла до модели

$X, \text{ см}$	Расчет ($S_0 = 4.14 \cdot 10^5$)			Эксперимент		Расчет ($\gamma = 0.1$)		
	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w	Q_w	P_w	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w
	Вт/см ²		гПа	Вт/см ²	гПа	Вт/см ²		гПа
30	531.62	189.63	39.58	505.68	39.39	515.67	209.23	39.10
40	412.38	147.39	26.71	410.33	26.66	401.28	162.80	26.69
50	334.70	119.50	18.54	324.1	18.47	318.06	130.52	18.60

Таблица 4

Сравнение тепловых потоков для расчетов и эксперимента для выходного сечения сопла $D_s = 50$ мм, диаметра модели $d_M = 30$ мм, давлений в барокамере 8.5 гПа, расходе воздуха $G = 3.6$ г/с, мощности ВЧ-генератора $W = 64$ кВт. X – расстояние от среза сопла до модели

$X, \text{ см}$	Расчет ($S_0 = 4.14 \cdot 10^{15}$)			Эксперимент		Расчет ($\gamma = 0.1$)		
	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w	Q_w	P_w	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w
	Вт/см ²		гПа	Вт/см ²	гПа	Вт/см ²		гПа
30	322.36	126.91	31.8	319.22	31.73	328.4	128.08	31.8
40	281.05	111.17	27.24	283.33	27.20	287.54	126.82	27.24
50	224.13	90.92	23.56	225.91	22.05	230.33	102.61	23.50

Таблица 5

Сравнение тепловых потоков для расчетов и эксперимента для выходного сечения сопла $D_s = 30$ мм, диаметра модели $d_M = 20$ мм, давлений в барокамере 12 гПа, расходе воздуха $G = 4.8$ г/с, мощности ВЧ-генератора $W = 64$ кВт. X – расстояние от среза сопла до модели

$X, \text{ см}$	Расчет ($S_0 = 4.14 \cdot 10^{15}$)			Эксперимент		Расчет ($\gamma = 0.1$)		
	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w	Q_w	P_w	Q_w	$-\lambda dT/dn$	P_w
	Вт/см ²		гПа	Вт/см ²	гПа	Вт/см ²		гПа
30	671.26	241.49	58.88	651.02	59.96	675.58	278.001	58.84
40	524.16	200.95	39.40	515.9	40.01	518.74	211.56	39.44
50	411.55	148.04	28.16	400.79	28.43	403.20	164.42	28.17

3. Заключение

Для условий экспериментов на индукционном ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) по теплообмену медной водоохлаждаемой цилиндрической модели с торцевым затуплением в носовой части выполнено численное моделирование ее обтекания недорасширенными сверхзвуковыми струями высокоэнтальпийного воздуха с учетом химических реакций в потоке и на холодной поверхности в рамках уравнений Навье – Стокса.

Проведено сравнение тепловых потоков к поверхностям торцевых датчиков в широком диапазоне параметров для различных моделей граничных условий: модели Гуларда и с использованием модели постадийной гетерогенной кинетики.

Для каждой из этих двух моделей найдены по единственному параметру, при которых в расчетах получены тепловые потоки, совпадающие друг с другом и с экспериментальными значениями.

Показано, что использование параметра γ в модели Гуларда и физически ясного и обоснованного параметра S_0 – числа центров адсорбции, позволяет добиться хорошего согласия расчетных значений по тепловому потоку друг с другом и с экспериментальными данными.

Последнее обстоятельство позволяет использовать модель Гуларда для постановки граничных условий на поверхности тел при расчете тепловых потоков к моделям.

Литература

1. Колесников А. Ф. Условия моделирования в дозвуковых течениях теплопередачи от высокоэнтальпийного потока к критической точке затупленного тела // Известия РАН Механика жидкости и газа. 1993. № 1. С. 172–180.
2. Kolesnikov A. F. The Concept of Local Simulation for Stagnation Point Heat Transfer in Hypersonic Flows: Applications and Validation. AIAA Paper 2000-2515. <https://doi.org/10.2514/6.2000-2515>
3. Колесников А. Ф. Условия локального подобия термохимического взаимодействия высокоэнтальпийных потоков газов с неразрушаемой поверхностью // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 118–125.
4. Колесников А. Ф., Сахаров В. И. Подобие теплообмена модели в недорасширенных струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазмотроне и при обтекании сферы высокоскоростным потоком в земной атмосфере // Изв. РАН МЖГ. 2016. № 3. С. 110–116.
5. Сахаров В. И. Численное моделирование течений в индукционном высокочастотном плазмотроне и теплообмена в недорасширенных струях воздуха // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), 2007. № 3. С. 61–64.
6. Гордеев А. Н., Колесников А. Ф., Сахаров В. И. Течение и теплообмен в недорасширенных неравновесных струях индукционного плазмотрона // Изв. РАН МЖГ. 2011. № 4. С. 130–142.
7. 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.
8. Goulard R. On Catalytic Recombination Rates in Hypersonic Stagnation Heat Transfer // J. Jet Propuls. 1958. Vol. 28, № 11. Pp. 737–745.
9. Крупнов А. А., Погосбекян 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. Т. 25, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2024-25-6/articles/1161/>
10. Крупнов А. А., Погосбекян М. Ю., Сахаров В. И. Применение моделей гетерогенного катализа при решении задач струйного обтекания моделей из меди для условий экспериментов на индукционном ВЧ-плазмотроне // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2023. Т. 24, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-4/articles/1060/>
11. 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.
12. Гурвич Л. В., Вейц И. В., Медведев В. А. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Москва: Наука, 1978. <https://doi.org/10.1615/0-8493-9926-2.0>
13. 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.
14. Ибрагимова Л. Б., Смехов Г. Д., Шаталов О. П. Константы скорости диссоциации двухатомных молекул в термически равновесных условиях // Изв. РАН МЖГ. 1999. № 1. С. 181–186.

15. Лосев С. А., Макаров В. Н., Погосбекян М. Ю. Модель физико-химической кинетики за фронтом очень сильной ударной волны в воздухе // Изв. РАН МЖГ. 1995. № 2. С. 169–182.
16. 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.
17. 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.
18. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K. The Properties of Gases and Liquids. New York: McGrawHil, 1977. 688 p.
19. Васильевский С. А. Колесников А. Ф. Численное моделирование течений равновесной индукционной плазмы в цилиндрическом канале плазматрона // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2000. № 5. С. 164–173.

References

1. Kolesnikov A. F., Conditions for modeling heat transfer in subsonic flows from a high-enthalpy flow to the critical point of a blunt body, *Fluid Dynamic*, 1993, no. 1. pp. 172–180.
2. Kolesnikov A. F., The Concept of Local Simulation for Stagnation Point Heat Transfer in Hypersonic Flows: Applications and Validation, AIAA Paper 2000-2515. <https://doi.org/10.2514/6.2000-2515>
3. Kolesnikov A. F., Conditions of local similarity of thermochemical interaction of high-enthalpy gas flows with an indestructible surface, *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 118–125. <https://doi.org/10.1134/S0018151X13060151>
4. 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 Dynamic*, 2016, vol. 51, no. 3, pp. 400. DOI: 10.1134/S0015462816030121.
5. 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.
6. Gordeev A. N., Kolesnikov A.F., Sakharov V.I. Flow and heat transfer in underexpanded nonequilibrium jets of an induction plasmatron, *Fluid Dynamic*, 2011, vol. 46, no. 4. pp. 623. DOI: 10.1134/S0015462811040120
7. Sakharov V. I., Numerical Simulation of Thermally and Chemically Nonequilibrium Flows and Heat Transfer in Underexpanded Induction Plasmatron Jets, *Fluid Dynamic*, 2007, vol. 42, no. 6. pp. 1007. DOI: 10.1134/S0015462807060166
8. Goulard R., On Catalytic Recombination Rates in Hypersonic Stagnation Heat Transfer, *J. Jet Propuls.*, 1958, vol. 28, no. 11, pp. 737–745. <https://doi.org/10.2514/8.7444>
9. 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.edu.ru/issues/2024-25-6/articles/1161/>
10. 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 in the journal, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, iss. 4 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-4/articles/1060/>
11. 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.
12. Gurvich L. V., Veits I. V., Alcock C. B., *Thermodynamic properties of individual substances*, Begell, 1994. <https://doi.org/10.1615/0-8493-9926-2.0>

13. Losev S. A., et al., Thermochemical nonequilibrium kinetic models in strong shock waves on air, 6th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1994. <https://doi.org/10.2514/6.1994-1990>
14. Ibragimova L. B., Smekhov G. D., Shatalov O. P., Dissociation rate constants of diatomic molecules under thermal equilibrium conditions, *Fluid Dynamic*, 1999, vol. 34, pp. 153–157. <https://doi.org/10.1007/BF02698767>
15. Losev S. A., Makarov V. N., Pogosbekyan M. Yu., Model of physicochemical kinetics behind the front of a very strong shock wave in air, *Fluid Dynamic*, 1995, vol. 30, pp. 299–309. <https://doi.org/10.1007/BF02029844>
16. 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. <https://doi.org/10.2514/3.496>
17. Hirschfelder J. O., Curtiss C. F., Bird R. B., *The Molecular Theory of Gases and Liquids*, New York: John Willey and Sons, 1954, 1219 p.
18. Reid R. C., Prausnitz J. M., Sherwood T. K., *The Properties of Gases and Liquids*, New York: McGrawHil, 1977. 688 p.
19. Vasilievsky S. A. Kolesnikov A. F. Numerical modeling of equilibrium induction plasma flows in a cylindrical plasma torch channel, *Fluid Dynamic*, 2000, vol. 35, no. 5, pp. 164–173.

Статья поступила в редакцию 5 августа 2025 г.