

Теплообмен и визуализация течения на поверхности медной пластины при ее обтекании струями воздушной плазмы

© А.Н. Гордеев, А.В. Чаплыгин

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Москва, 119526, Россия

В ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 ИПМех РАН экспериментально исследован теплообмен дозвукового потока воздушной плазмы, истекающего из водоохлаждаемого целевого сопла с размерами выходного сечения 40×8 мм, с поверхностью медной пластины под углом атаки. С помощью медных нестационарных калориметрических датчиков получены распределения тепловых потоков вдоль оси симметрии пластины 50×50 мм в зависимости от мощности анодного питания ВЧ-генератора плазмотрона и угла атаки. Предложен и протестирован метод визуализации течения у поверхности пластины под углом атаки, основанный на процессе вдува ацетилен в пограничный слой. Получены спектр воздушной плазмы и спектр воздушной плазмы при вдуве в поток ацетилен через отверстия на поверхности пластины. При вдуве в основной поток ацетилен был отмечен существенный рост излучения циана (CN), а также наблюдались полосы Свана.

Ключевые слова: ВЧ-плазмотрон, целевое сопло, диссоциированный воздух, теплообмен, пластина под углом атаки, визуализация течения

Введение. При создании новых конструкций возвращаемых космических аппаратов большое значение имеют работы по исследованию перспективных высокотемпературных материалов [1–3]. Для того чтобы экспериментально моделировать аэродинамический нагрев образцов подобных материалов, можно использовать индукционные ВЧ-плазмтроны [4–7]. Их отличают высокая чистота потока, длительное время работы и хорошая повторяемость режимов, что позволяет изучить термохимическое взаимодействие диссоциированных газов с поверхностью, включая процессы абляции, окисления и катализа. С помощью ВЧ-плазмтронов ВГУ-3 и ВГУ-4 ИПМех РАН [8] можно проводить испытания моделей и образцов материалов как осесимметричной формы, так и в виде пластин.

Пластина как объект исследования представляет особый интерес при моделировании теплообмена боковой поверхности летательного аппарата (ЛА). Однако при испытаниях пластины под углом атаки в струях плазмтронов ВГУ-3 и ВГУ-4 течение у ее поверхности может иметь сложный пространственный характер, обусловленный закруткой потока в разрядном канале из-за конструктивных особенностей установок.

Для прогнозирования экспериментальных режимов требуется проводить систематические исследования теплообмена на геометри-

чески подобных моделях, а в случае учета особенностей течения, реализуемого в плазмотроне, необходима визуализация картины обтекания.

Представленная работа имела две основные цели: дополнить приведенные в [9] режимы теплообмена медной пластины в струях плазмотрона ВГУ-4, истекающих из щелевого сопла с размерами выходного сечения 40×8 мм, новыми данными для углов атаки 0 и 30° , а также отработать способ визуализации течения у поверхности медной пластины, основанный на процессе вдува ацетилена в пограничный слой.

Экспериментальная установка. Исследования проводились в высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4 [8]. Он позволяет проводить исследования в дозвуковых и сверхзвуковых потоках плазмы при давлениях в испытательной камере от 6 до 1000 гПа, мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию от 12 до 72 кВт (кратковременно до 85 кВт) и расходе газа 2...6 г/с.

При экспериментальных исследованиях образцов в виде пластин для формирования потока воздушной плазмы за разрядным каналом плазмотрона можно устанавливать водоохлаждаемые щелевые сопла. В ИПМех РАН используются щелевые сопла с размерами выходных сечений: 40×8 , 80×15 , 120×9 и 200×30 мм [10–12]. В данной работе применялось сопло с выходным сечением 40×8 мм (рис. 1).

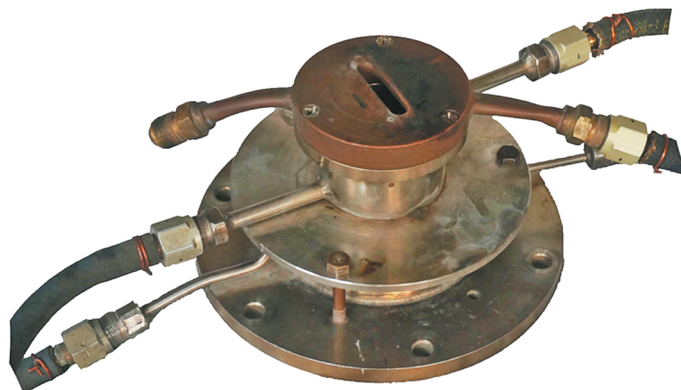


Рис. 1. Щелевое сопло с размерами выходного сечения 40×8 мм

Тепловые потоки. Для измерения теплового потока была использована медная модель — пластина размерами $50 \times 50 \times 10$ мм. Вдоль вертикальной оси симметрии пластины на расстоянии 10, 20, 30 и 40 мм от нижнего края лицевой поверхности установлены нестационарные калориметрические датчики тепловых потоков (рис. 2) [13]. Они представляют собой цилиндры, выполненные из бескислородной меди, с термопарой на тыльной стороне. Масса каждого дат-

чика — $1,69 \pm 0,01$ г, диаметр — 5 мм, высота — 10 мм. Внешний вид медной пластины под углом атаки в дозвуковом потоке воздушной плазмы приведен на рис. 3.

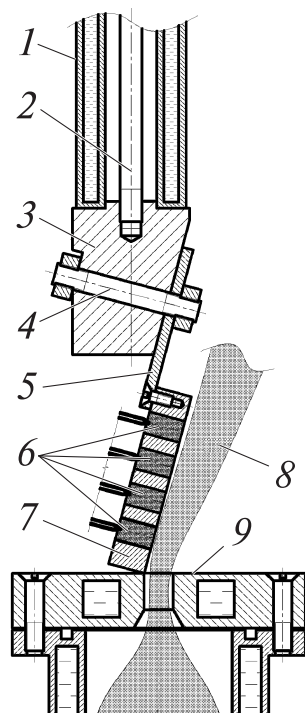


Рис. 2. Схематический чертеж модели-пластины для измерения тепловых потоков: 1 — водоохлаждаемая державка; 2 — стяжная шпилька; 3 — угловая насадка; 4 — крепежный винт; 5 — монтажная пластина; 6 — калориметр с термопарой; 7 — медная пластина размерами 50×50 мм; 8 — струя плазмы; 9 — щелевое сопло 40×8 мм

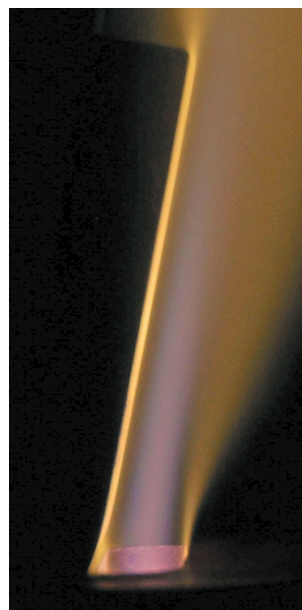


Рис. 3. Внешний вид медной пластины под углом атаки в дозвуковом потоке воздушной плазмы

Измерения проводили при массовом расходе воздуха $2,4$ г/с и давлении в барокамере плазмотрона 100 гПа. Пластины устанавливали под углами атаки 0 и 30° .

Результаты измерений тепловых потоков при различных значениях мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию, дополненные данными для угла атаки 15° [9], приведены на рис. 4–6. На всех представленных графиках: z (мм) — координата, отсчитываемая по поверхности пластины от среза сопла, q ($\text{кВт}/\text{м}^2$) — плотность теплового потока.

На поверхности медной пластины были реализованы тепловые потоки плотностью от 380 до 3750 $\text{кВт}/\text{м}^2$. Максимальный тепловой поток был достигнут при мощности ВЧ-генератора плазмотрона по

анодному питанию 70 кВт и угле атаки пластины 30° . Наиболее равномерное распределение теплового потока вдоль оси пластины наблюдалось при углах атаки 15° и 30° и мощности ВЧ-генератора по анодному питанию от 20 до 40 кВт.

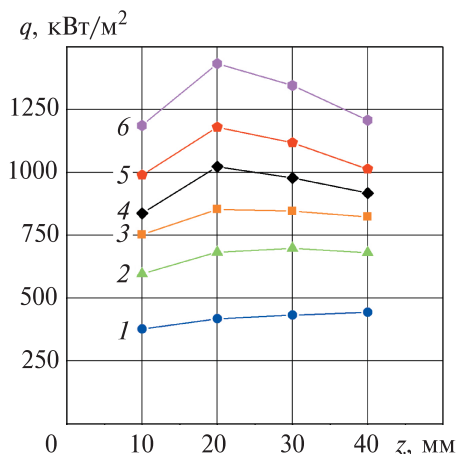


Рис. 4. Изменение теплового потока q вдоль оси симметрии z медной пластины при давлении 100 гПа и угле атаки 0° :
 1 — $N = 20$ кВт; 2 — 30 кВт; 3 — 40 кВт;
 4 — 50 кВт; 5 — 60 кВт; 6 — 70 кВт

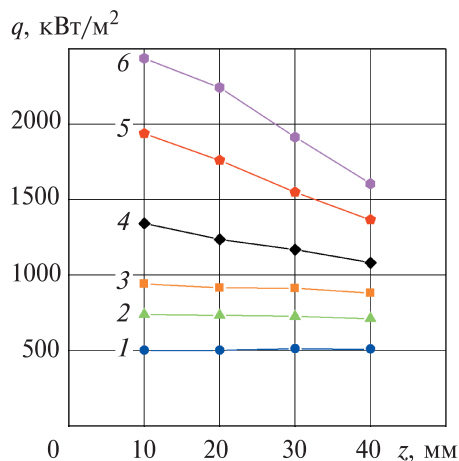


Рис. 5. Изменение теплового потока q вдоль оси симметрии z медной пластины при давлении 100 гПа и угле атаки 15° (по данным [9]):
 1 — $N = 20$ кВт; 2 — 30 кВт; 3 — 40 кВт;
 4 — 50 кВт; 5 — 60 кВт; 6 — 70 кВт

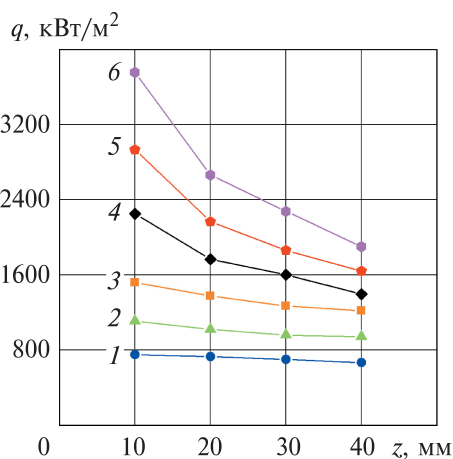


Рис. 6. Изменение теплового потока q вдоль оси симметрии z медной пластины при давлении 100 гПа и угле атаки 30° :
 1 — $N = 20$ кВт; 2 — 30 кВт; 3 — 40 кВт; 4 — 50 кВт; 5 — 60 кВт; 6 — 70 кВт

Визуализация течения. При обтекании поверхности пластины, установленной под углом атаки за выходным сечением щелевого сопла, возможно отклонение линий тока от направления вертикаль-

ной оси симметрии, вызванное остаточной закруткой потока плазмы. Для лучшего понимания этого явления потребовалось разработать методику визуализации течения, адекватную условиям эксперимента. Приемы визуализации, основанные на стандартной фотосъемке и высокоскоростной видеосъемке [14, 15], оказались малоинформативными, когда потребовалось определить направление линий тока на поверхности пластины. Было принято решение протестировать подход, основанный на процессе вдува химически реагирующего газа в пограничный слой. Вдув газа с поверхности модели в набегающий плазменный поток был представлен в работах [16–18], однако в большинстве исследований вдув в пограничный слой применялся для моделирования процесса пиролиза разрушаемого теплозащитного материала.

В рассматриваемом случае нужно было получить у поверхности пластины хорошо различимые на фотографиях и термовизонных изображениях факелы от вдуваемого газа, ориентированные вдоль направлений линий тока основного течения. С этой целью в потоке устанавливали медную водоохлаждаемую пластину с пятью равномерно распределенными отверстиями диаметром 0,3 мм вдоль нижнего края (на расстоянии 10 мм от него). Через отверстия выполнялся вдув ацетилена в набегающий поток (рис. 7). В результате наблюдались вытянутые факелы голубого цвета, поджатые потоком к поверхности пластины (рис. 7, а). Интенсивность излучения образующихся струй была существенно выше, чем у воздушной плазмы в основном потоке. На рис. 8 приведены спектр воздушной плазмы и спектр воздушной плазмы при вдуве в поток ацетилена. Спектры получены с помощью дифракционного спектрометра Ocean Optics HR4000 в рамках одного эксперимента при выдержке 100 мс. При вдуве ацетилена в воздушную плазму существенно возрастает интенсивность излучения циана CN [19], хорошо различимы полосы Свана C_2 и неразрешенный триплет кислорода O (777 нм) [20].

На рис. 7, б можно наблюдать отклонение линий тока от вертикальной оси, обусловленное остаточной закруткой набегающего потока. Угол отклонения линий тока зависит от режима работы плазмотрона (давление в затопленном пространстве, расход воздуха, мощность установки, угол атаки и т. д.). На рис. 7, б заметны характерные сажевые следы, которые остаются на медной поверхности при взаимодействии с факелом ацетилена, эти следы сохраняются и после эксперимента, что существенно упрощает задачу по определению углов наклона линий тока.

Отметим, что ацетилен является не единственным газом, который можно использовать в модели. Пробные эксперименты показали, что идентичные картины наблюдаются и при вдуве пропана.

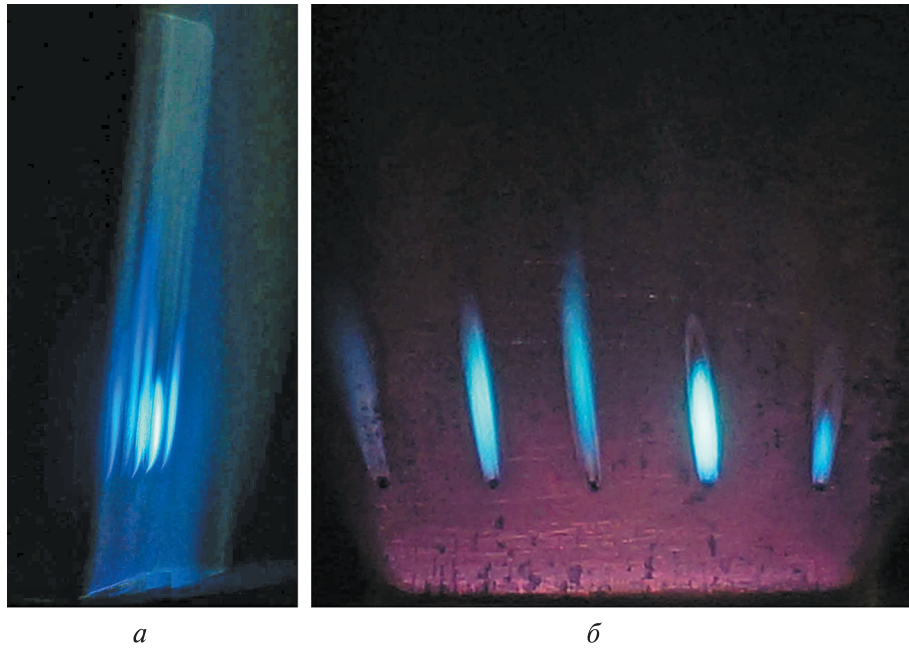


Рис. 7. Вид струй ацетилена в пограничном слое на поверхности пластины под углом (а) и спереди (б)

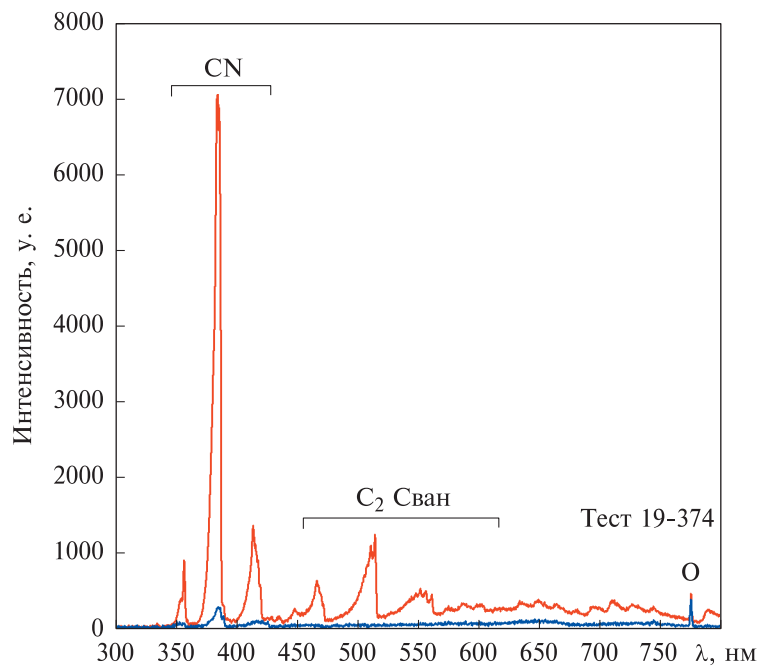


Рис. 8. Спектр воздушной плазмы (—) и спектр воздушной плазмы при вдуве в поток ацетилена (—)

Заключение. С помощью нестационарных калориметрических датчиков были получены распределения теплового потока вдоль оси медной пластины размерами $50 \times 50 \times 10$ мм при ее обтекании воздушной плазмой, истекающей из щелевого сопла с выходным сечением 40×8 мм. При углах атаки от 0 до 30° , давлении 100 гПа и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию от 20 до 70 кВт на поверхности пластины были реализованы тепловые потоки плотностью от 380 до 3750 кВт/м². Отмечено достаточно равномерное распределение теплового потока вдоль оси пластины при углах атаки 15° и 30° и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию от 20 до 40 кВт.

Показана принципиальная возможность визуализации линий тока у поверхности пластины под углом атаки, обтекаемой воздушной плазмой, путем вдува в пограничный слой реагирующего газа (ацетилена). Получен спектр излучения воздушной плазмы при вдуве в поток ацетилена. Наблюдались спектральные полосы CN, C₂ и линии O.

Следующими шагами в решении задачи визуализации течения могут служить усовершенствование используемой водоохлаждаемой медной модели (введение дополнительных отверстий) и применение в качестве вдуваемого газа пропана. После доработки модели можно перейти к непосредственному исследованию течения у поверхности пластины при различных режимах обтекания.

*Работа выполнена в рамках государственного задания
(номер государственной регистрации АААА-А20-120011690135).*

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Harris R., Stewart M., Koenig W. Thermal Protection Systems Technology Transfer from Apollo and Space Shuttle to the Orion Program. *2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, 2018, art. 5134.
- [2] Laub B., Venkatapathy E. Thermal protection system technology and facility needs for demanding future planetary missions. *Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science*, 2004, vol. 544, pp. 239–247.
- [3] Milos F.S., Gasch M.J., Prabhu D.K. Conformal phenolic impregnated carbon ablator arcjet testing, ablation, and thermal response. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, vol. 52, no. 3, pp. 804–812.
- [4] Vasil'evskii S.A., Gordeev A.N., Kolesnikov A.F. Local modeling of the aerodynamic heating of the blunt body surface in subsonic high-enthalpy air flow. Theory and experiment on a high-frequency plasmatron. *Fluid Dynamics*, 2017, vol. 52, no. 1, pp. 158–164.
- [5] Жестков Б.Е. Комплекс стендов с индукционными подогревателями газа. *Вестник Казанского технологического университета*, 2011, №. 19, с. 63–69.
- [6] Owens W.P., Uhl J., Dougherty M., Lutz A., Meyers J., Fletcher D.G. Development of a 30 kW inductively coupled plasma torch for aerospace material testing. *10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, 2010, art. 4322.

- [7] Bottin B., Chazot O., Carbonaro M., Van der Haegen, V., Paris S. *The VKI plasmatron characteristics and performance*. von Karman Inst for Fluid Dynamics Rhode-Saint-Genese (Belgium), 2000.
- [8] Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Высокочастотные индукционные плазмотроны серии ВГУ. *Сб. Актуальные проблемы механики: Физико-химическая механика жидкостей и газов*. Москва, Наука, 2010, с. 151–177.
- [9] Гордеев А.Н., Чаплыгин А.В. Теплообмен в высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4 при использовании щелевых сопел. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 2.
DOI: 10.18698/2308-6033-2020-2-1953
- [10] Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Новые режимы течения и теплообмена плазмы в высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2008, т. 7.
URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/453/> (дата обращения 04.07.2020).
- [11] Гордеев А.Н., Чаплыгин А.В. Экспериментальное исследование теплообмена диссоциированного потока воздуха с плоской пластиной под углом атаки в ВЧ-плазмотроне. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2019, т. 20, вып. 1. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/780/> (дата обращения 04.07.2020).
- [12] Чаплыгин А.В., Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Новые режимы теплообмена в высокочастотном мегаваттном индукционном плазмотроне ВГУ-3. *XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*, 2019, с. 921–922.
- [13] *ASTM E457-08(2015), Standard Test Method for Measuring Heat-Transfer Rate Using a Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
URL: <https://www.astm.org/Standards/E457.htm> (дата обращения 04.07.2020).
- [14] Boulos M.I. Visualization and diagnostics of thermal plasma flows. *Journal of Visualization*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 19–28.
- [15] Cipullo A., Helber B., Panerai F., Zeni L., Chazot O. Investigation of freestream plasma flow produced by inductively coupled plasma wind tunnel. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2014, vol. 28, no. 3, pp. 381–393.
- [16] Yakushin M.I., Pershin I.S., Kolesnikov A.F. *An experimental study of stagnation point heat transfer from high-enthalpy reacting gas flow to surface with catalysis and gas injection*. European Space Agency-Publications-ESA SP, 2002, vol. 487, pp. 473–480.
- [17] Uhl J., Owens W., Dougherty M., Lutz A., Meyers J., Fletcher D. Pyrolysis simulation in an icp torch facility. *42nd AIAA Thermophysics Conference*, 2011, art. 3618.
- [18] Vancrayenest B., Tran M.D., Fletcher D.G. Stagnation Point Heat Transfer with Gas Injection Cooling. *Fifth European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles*, 2005, vol. 563, p. 75.
- [19] Herzberg G. *The spectra and structures of simple free radicals: an introduction to molecular spectroscopy*. Courier Corporation, 1988, p. 226.
- [20] Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2019.
DOI: 10.18434/T4W30F

Статья поступила в редакцию 04.07.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гордеев А.Н., Чаплыгин А.В. Теплообмен и визуализация течения на поверхности медной пластины при ее обтекании струями воздушной плазмы. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2020, вып. 9.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2020-9-2019>

Гордеев Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории «Взаимодействия плазмы и излучения с материалами» ИПМех РАН.

Чаплыгин Алексей Владимирович — ведущий инженер лаборатории «Взаимодействия плазмы и излучения с материалами» ИПМех РАН.
e-mail: alchap187@gmail.com

Heat transfer and visualization of the flow on the surface of a copper plate when it is flowed around by air plasma jets

© A.N. Gordeev, A.V. Chaplygin

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, 119526, Russia

The heat transfer between subsonic air plasma jets flowing from a water-cooled slit nozzle with an outlet cross-section of 40×8 mm and the surface of a copper plate at an angle of attack was experimentally investigated in the HF plasmatron VGU-4 of IPMech RAS. Using copper thermal capacitance calorimeters, the distributions of heat fluxes along the axis of symmetry of the plate of 50×50 mm were obtained depending on the power of the anode power supply of the HF generator of the plasmatron and the angle of attack. The study introduced and tested a method for visualizing the flow near the plate surface at the angle of attack, based on the injection of acetylene into the boundary layer. We obtained the spectrum of air plasma and the spectrum of air plasma when acetylene is injected into the flow through holes on the plate surface. Upon injection of acetylene into the main flow, a significant increase in the emission of cyanogen (CN) was noted, and Swan bands (C2) were observed.

Keywords: HF plasmatron, slit nozzle, dissociated air, heat transfer, plate at an angle of attack, flow visualization

REFERENCES

- [1] Harris R., Stewart M., Koenig W. Thermal Protection Systems Technology Transfer from Apollo and Space Shuttle to the Orion Program. *2018 AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, 2018, art. 5134.
- [2] Laub B., Venkatapathy E. Thermal protection system technology and facility needs for demanding future planetary missions. *Planetary Probe Atmospheric Entry and Descent Trajectory Analysis and Science*, 2004, vol. 544, pp. 239–247.
- [3] Milos F.S., Gasch M.J., Prabhu D.K. Conformal phenolic impregnated carbon ablator arcjet testing, ablation, and thermal response. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2015, vol. 52, no. 3, pp. 804–812.
- [4] Vasil'evskii S.A., Gordeev A.N., Kolesnikov A.F. Local modeling of the aerodynamic heating of the blunt body surface in subsonic high-enthalpy air flow. Theory and experiment on a high-frequency plasmatron. *Fluid Dynamics*, 2017, vol. 52, no. 1, pp. 158–164.
- [5] Zhestkov B.E. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta (Bulletin of Kazan National Research Technological University)*, 2011, no. 19, pp. 63–69.
- [6] Owens W.P., Uhl J., Dougherty M., Lutz A., Meyers J., Fletcher D.G. Development of a 30 kW inductively coupled plasma torch for aerospace material testing. *10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, 2010, art. 4322.
- [7] Bottin B., Chazot O., Carbonaro M., Van der Haegen, V., Paris S. *The VKI plasmatron characteristics and performance*. von Karman Inst for Fluid Dynamics Rhode-Saint-Genese (Belgium), 2000.
- [8] Gordeev A.N., Kolesnikov A.F. Vysokochastotnye induktsionnye plazmotrony serii VGU [High-frequency induction plasmatrons of the VGU series]. *Sb. Aktualnye problemy mekhaniki: Fiziko-khimicheskaya mekhanika zhidkostey i gazov* [Coll. papers. Actual problems of mechanics: Physical and chemical mechanics of liquids and gases]. Moscow, Nauka Publ., 2010, pp. 151–177.

- [9] Gordeev A.N., Chaplygin A.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2020, iss. 2.
DOI: 10.18698/2308-6033-2020-2-1953
- [10] Gordeev A.N., Kolesnikov A.F. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike — Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2008, vol. 7. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/453/> (accessed July 04, 2020).
- [11] Gordeev A.N., Chaplygin A.V. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike — Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2019, vol. 20, no. 1. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/780/> (accessed July 4, 2020).
- [12] Chaplygin A.V., Vasil'evskii S.A., Gordeev A.N., Kolesnikov A.F. Novye rezhimy teploobmena v vysokochastotnom megavattnom induktsionnom plazmatrone VGU-3 [New modes of heat transfer in the VGU-3 high-frequency megawatt induction plasmatron]. *XII Vserossiiskiy s'yezd po fundamentalnym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki [XII All-Russian Congress on Fundamental Problems of Theoretical and Applied Mechanics]*. 2019, pp. 921–922.
- [13] *ASTM E457-08(2015), Standard Test Method for Measuring Heat-Transfer Rate Using a Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. Available at: <https://www.astm.org/Standards/E457.htm> (accessed July 04, 2020).
- [14] Boulos M. I. Visualization and diagnostics of thermal plasma flows. *Journal of Visualization*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 19–28.
- [15] Cipullo A., Helber B., Panerai F., Zeni L., Chazot O. Investigation of freestream plasma flow produced by inductively coupled plasma wind tunnel. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2014, vol. 28, no. 3, pp. 381–393.
- [16] Yakushin M.I., Pershin I.S., Kolesnikov A.F. An experimental study of stagnation point heat transfer from high-enthalpy reacting gas flow to surface with catalysis and gas injection. *European Space Agency-Publications-ESA SP*, 2002, vol. 487, pp. 473–480.
- [17] Uhl J., Owens W., Dougherty M., Lutz A., Meyers J., Fletcher D. Pyrolysis simulation in an icp torch facility. *42nd AIAA Thermophysics Conference*, 2011, art. 3618.
- [18] Vancrayenest B., Tran M.D., Fletcher D.G. Stagnation Point Heat Transfer with Gas Injection Cooling. *Fifth European Symposium on Aerothermodynamics for Space Vehicles*, 2005, vol. 563, p. 75.
- [19] Herzberg G. *The spectra and structures of simple free radicals: an introduction to molecular spectroscopy*. Courier Corporation, 1988.
- [20] Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J. and NIST ASD Team. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. 2019. DOI: 10.18434/T4W30F

Gordeev A.N., Cand. Sc. (Phys-Math.), Lead Research Fellow, Laboratory for Interaction of Plasma and Radiation with Materials, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS.

Chaplygin A.V., Lead Engineer, Laboratory for Interaction of Plasma and Radiation with Materials, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS.
e-mail: alchap187@gmail.com