

Characterization of Subsonic Air Plasma Jets in the VGU-3 High-Frequency Induction Plasmatron

A. V. Chaplygin, A. F. Kolesnikov

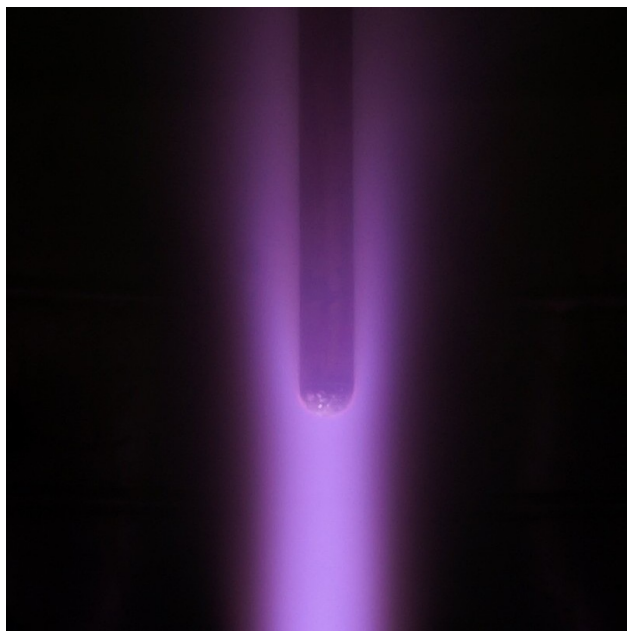
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russia*

chaplygin@ipmnet.ru

Abstract

The distributions of dynamic pressures and heat fluxes in subsonic jets of the VGU-3 high-frequency plasmatron flowing from a conical water-cooled nozzle with an outlet diameter of 80 mm were obtained experimentally. Dynamic pressures were measured using a Pitot-Prandtl tube. Heat fluxes were measured using a water-cooled calorimetric probe with a copper heat-absorbing surface. A thermal imager was used to obtain temperature distributions on the outer surface of the quartz discharge channel of the plasmatron with and without the nozzle installed. All experiments were conducted at anode power supplies of 100 and 250 kW for pressures in the plasmatron test chamber of 5 and 10 kPa.

Keywords: HF plasmatron, dissociated air, plasma diagnostics, induction plasma.



Pitot – Prandtl tube in the air plasma jet of the VGU-3 HF plasmatron

УДК 533.6.011.8

Диагностика дозвуковых струй воздушной плазмы в высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-3

А. В. Чаплыгин, А. Ф. Колесников

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
Россия, Москва, 119526, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1
chaplygin@ipmnet.ru*

Аннотация

Экспериментально получены распределения динамических давлений и тепловых потоков в дозвуковых струях ВЧ-плазмотрона ВГУ-3, истекающих из конического водоохлаждаемого сопла с диаметром выходного сечения 80 мм. Динамические давления измерены трубкой Пито – Прандтля. Тепловые потоки измерены водоохлаждаемым калориметрическим зондом с медной тепловоспринимающей поверхностью. С помощью тепловизора получены распределения температур на внешней поверхности кварцевого разрядного канала плазмотрона при использовании сопла и без установленного сопла. Все эксперименты проведены при мощностях анодного питания 100 и 250 кВт для давлений в испытательной камере плазмотрона 5 и 10 кПа.

Ключевые слова: ВЧ-плазмотрон, диссоциированный воздух, диагностика плазмы, индукционная плазма.

1. Введение

Мощные высокочастотные (ВЧ) индукционные плазмотроны широко применяются для моделирования условий входа космических аппаратов в атмосферы различных планет. Подобные экспериментальные установки созданы в России (ЦНИИМаш [1], ЦАГИ [2], ИПМех РАН [3]), Германии [4–6], Бельгии [7–9], США [10–12], Китае [13–15], Японии [16] и Франции [17–19]. ВЧ-плазмотрон ИПМех РАН ВГУ-3 с подведенной мощностью 1 МВт активно использовался при отработке плиточной тепловой защиты орбитального корабля «Буран» [20, 21]. Установка ВГУ-3, созданная в 1984 году, до настоящего времени позволяет проводить научные исследования конкурентного мирового уровня и ее возможности не исчерпаны. Область моделирования аэродинамического нагрева в установке ВГУ-3 может быть существенно расширена за счет использования сопел, устанавливаемых на выходе из разрядного канала плазмотрона, как это ранее было сделано в ВЧ-плазмотроне следующего поколения ВГУ-4 [22]. В ИПМех РАН для ВЧ-плазмотрона ВГУ-3 изготовлены коническое водоохлаждаемое сопло с диаметром выходного сечения 80 мм [23] и щелевое сопло с размерами выходного сечения 200 × 30 мм [24].

Цель представленной работы – получить массив экспериментальных данных (динамические давления, тепловые потоки), характеризующих дозвуковую струю воздушной плазмы, истекающей из конического водоохлаждаемого сопла с диаметром выходного сечения 80 мм, в зависимости от давления в испытательной камере и мощности анодного питания ВЧ-генератора плазмотрона ВГУ-3, а также исследовать влияние сопла на тепловой режим кварцевого разрядного канала.

2. Экспериментальная установка

Основные характеристики установки ВГУ-3 приведены в таблице 1. Схема установки ВГУ-3 (современное состояние) показана на рис. 1. Подробное описание ВЧ-плазмотрона ВГУ-3 дано в [3].

Таблица 1

Основные характеристики установки ВГУ-3

Мощность анодного питания, кВт	100 ÷ 750
Частота, МГц	0.44
Диаметр разрядного канала, мм	150, 200
Расход газа, г/с	4 ÷ 14
Рабочие газы	Воздух, азот
Давление в испытательной камере, кПа	1 ÷ 100

В представленной работе измерения динамических давлений и тепловых потоков выполнены в дозвуковых струях воздушной плазмы, истекающих из конического водоохлаждаемого сопла с диаметром выходного сечения 80 мм (поз. 12, рис. 1), которое устанавливалось за цилиндрическим кварцевым разрядным каналом диаметром 200 мм (поз. 4, рис. 1), толщина стенки разрядного канала составляет 4.5 ÷ 5 мм.

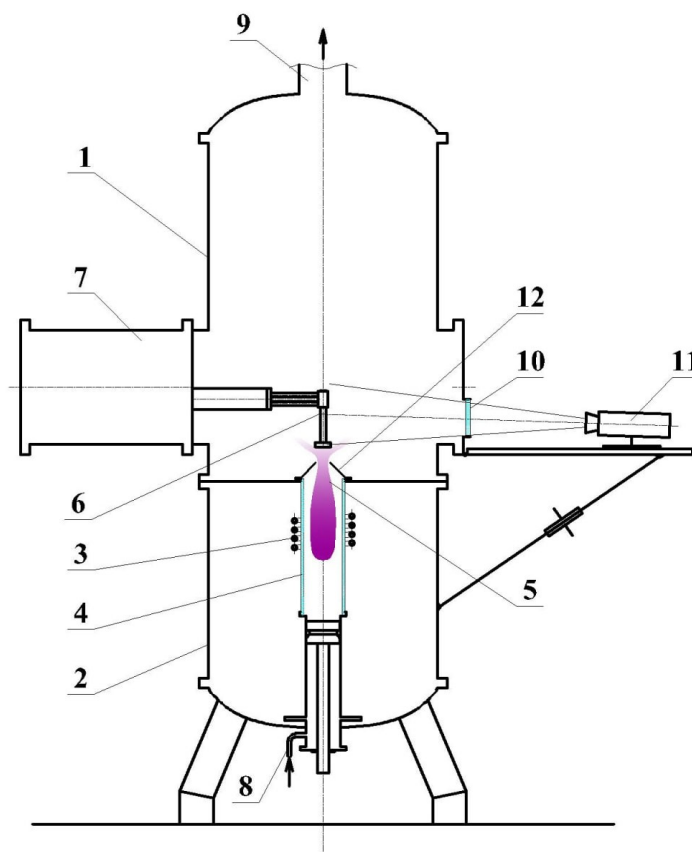


Рис. 1. Схема ВЧ-плазмотрона ВГУ-3: 1 – испытательная камера, 2 – индукторная камера, 3 – индуктор, 4 – кварцевый разрядный канал, 5 – плазма, 6 – зонд, 7 – координатное устройство, 8 – устройство подачи газа, 9 – вакуумный трубопровод, 10 – оптическое окно, 11 – оптические средства измерения, 12 – коническое водоохлаждаемое сопло

Высота Z измерительного зонда (поз. 6, рис. 1) относительно выходного сечения сопла могла изменяться с помощью привода координатного устройства (поз. 7, рис. 1) в интервале от 0 до 120 мм непосредственно в ходе экспериментов, смещение R оси зонда относительно оси симметрии сопла задавалось между экспериментами вручную в интервале от 0 до 40 мм. Расход плазмообразующего воздуха через устройство подачи (поз. 8, рис. 1) контролировался с помощью U-образного манометра, подключенного к расходомерной шайбе. Откачка испытательной камеры (поз. 1, рис. 1) до заданного рабочего давления P_{ch} осуществлялась через вакуумный трубопровод (поз. 9, рис. 1). Давления в испытательной камере и разрядном канале контролировались преобразователями давления «Элемер» АИР-20/М2 с точностью измерения $\pm 0.2\%$.

Система измерений параметров работы генератора ВЧС1-630/0.44 обеспечивала проведение измерений напряжения до 10 кВ и токов до 50 А. В качестве датчика напряжения применялся высоковольтный термокомпенсированный высокоточный делитель напряжения. Для измерения токов применялись высокоточные шунты.

3. Результаты экспериментов

Эксперименты на установке ВГУ-3 выполнены при мощности анодного питания $N = 100$ и 250 кВт, расходе воздуха $G = 11$ г/с, давлении в испытательной камере $P_{ch} = 5$ и 10 кПа.

3.1. Тепловой режим разрядного канала

Особенностью конструкции плазмотронов серии ВГУ с вихревой стабилизацией потока является использование неохлаждаемого кварцевого разрядного канала. Однако с ростом мощности, вкладываемой в плазму, перегрев стенки канала может привести к его разрушению. Таким образом, исследование тепловых режимов разрядного канала является важной методической задачей для планирования экспериментов [25, 26]. Тепловые режимы разрядного канала установки ВГУ-3 в зависимости от подведенной мощности, расхода газа и давления в испытательной камере достаточно подробно изучены в [26], но только в конфигурации без использования конического сопла. Установка сопла может повлиять на тепловой режим, поскольку приводит к росту давления в разрядном канале и изменению картины течения. С помощью тепловизора Testo 868 получены распределения температур поверхности участков кварцевого разрядного канала установки ВГУ-3 в двух конфигурациях: без сопла и с установленным на выходе из разрядного канала коническим соплом. Спектральная излучательная способность кварца КВ, из которого изготовлен разрядный канал установки ВГУ-3, принималась равной 0.93 [27]. На время тепловизионной съемки иллюминатор индукторной камеры плазмотрона (на рис. 1 не показан) был снят, поэтому дополнительная поправка на пропускание оптического окна не требовалась. Сравнение полученных тепловизионных изображений (рис. 2) показало, что установка конического сопла приводит к слабому росту максимальной температуры кварцевой стенки разрядного канала. Замечание: области снимков различных участков канала на рис. 2 могут перекрываться, удобным ориентиром служит положение четырехвиткового индуктора (см. поз. 3, рис. 1). Максимальная температура внешней поверхности разрядного канала с коническим соплом при мощности анодного питания 250 кВт не превышала 715 К. С учетом оценки перепада температур между внешней и внутренней стенкой ~ 100 К [26] для рассмотренного диапазона мощностей ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию сохраняется допустимый тепловой режим кварцевой трубки разрядного канала, нагруженной внешним атмосферным давлением. Режимы повышенной анодной мощности (вплоть до 750 кВт) с соплом требуют отдельного исследования.

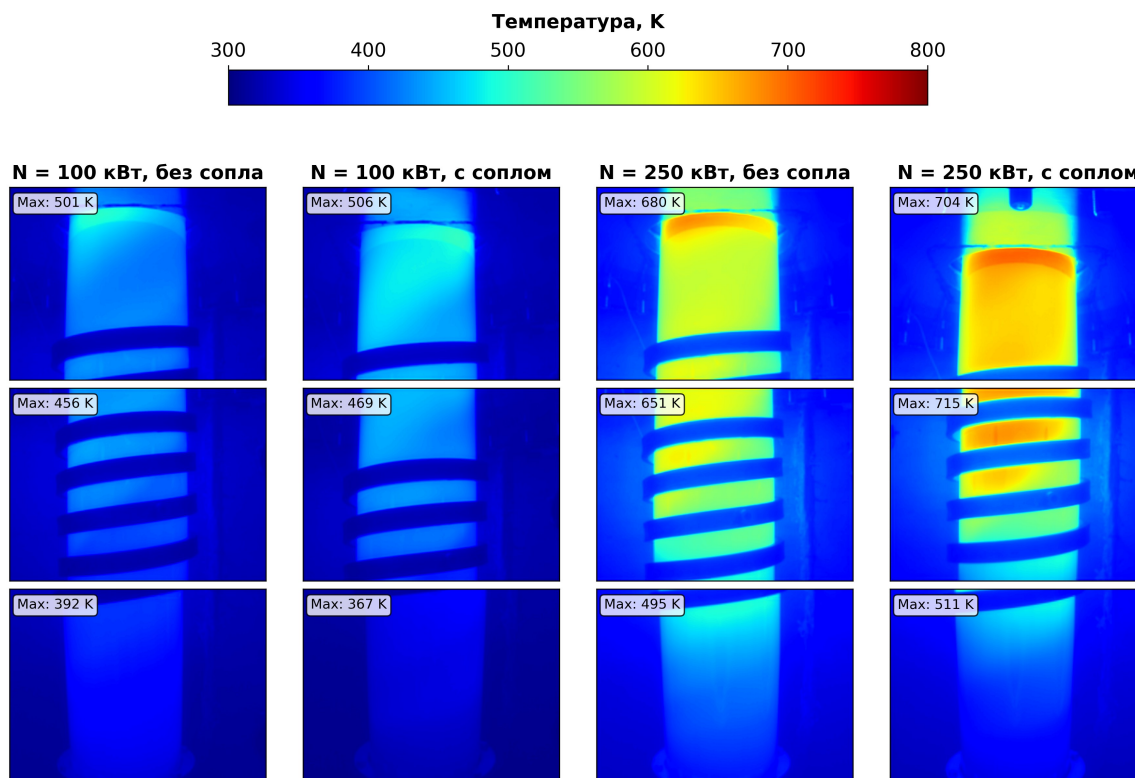


Рис. 2. Тепловизионные изображения верхней части (верхний ряд), области индуктора (средний ряд) и нижней части (нижний ряд) кварцевого разрядного канала ВЧ-плазмотрона ВГУ-3, полученные при давлении в испытательной камере $P_{ch} = 10$ кПа и расходе воздуха $G = 11$ г/с

3.2. Динамические давления

Для измерений динамических давлений (скоростных напоров) в дозвуковых струях воздушной плазмы установки ВГУ-3 использовалась новая медная водоохлаждаемая трубка Пито-Прандтля диаметром 16 мм со сферическим носком, изготовленная в ИПМех РАН. Схема трубки приведена на рис. 3, ее геометрия выбрана, исходя из рекомендаций [28] и конструктивных ограничений, накладываемых системой водяного охлаждения. Приемники полного (поз. 3, рис. 3) и статического давления (поз. 4, рис. 3) подключались к дифференциальному мембранному преобразователю давления «Элемер» АИР-20/М2-ДД (максимальный верхний предел измерений 1.6 кПа, предел допускаемой основной приведенной погрешности ± 0.2 %). Динамическое давление P_{dyn} определялась как разность полного и статического давлений из показаний дифференциального преобразователя. Измеренные динамические давления в зависимости от давления в испытательной камере, мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию и положения трубки Пито – Прандтля в дозвуковой струе воздушной плазмы представлены на рис. 4. Измерительный зонд диаметром 16 мм может заметно влиять на низконапорную дозвуковую струю плазмы с характерным диаметром 80 мм, что искажает измеряемую величину динамического давления, в особенности вблизи выходного сечения сопла или при смещении оси трубки относительно оси сопла (в последнем случае зонд обтекается несимметрично). Однако полученные при $P_{ch} = 5$ и 10 кПа распределения динамических давлений качественно показывают, что установка на выходе разрядного канала ВЧ-плазмотрона ВГУ-3 конического сопла позволяет сформировать достаточно однородную дозвуковую струю воздушной плазмы с ядром течения диаметром ~ 20 мм, где скоростной напор слабо изменяется в рассмотренном интервале высот Z от 0 до 120 мм (относительно выходного сечения сопла). Для анодной мощности 100 кВт при давлении в испытательной камере $P_{ch} = 5$ кПа поле динамических давлений близко к распределению, полученному при мощности 250 кВт, но для давления в испыта-

тельной камере $P_{ch} = 10$ кПа. Максимальное динамическое давление $P_{dyn} = 0.9$ кПа зарегистрировано на оси струи, на срезе выходного сечения сопла при $P_{ch} = 5$ кПа и $N = 250$ кВт.

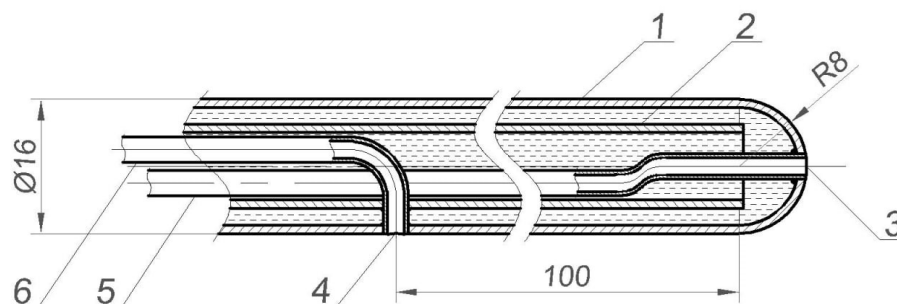
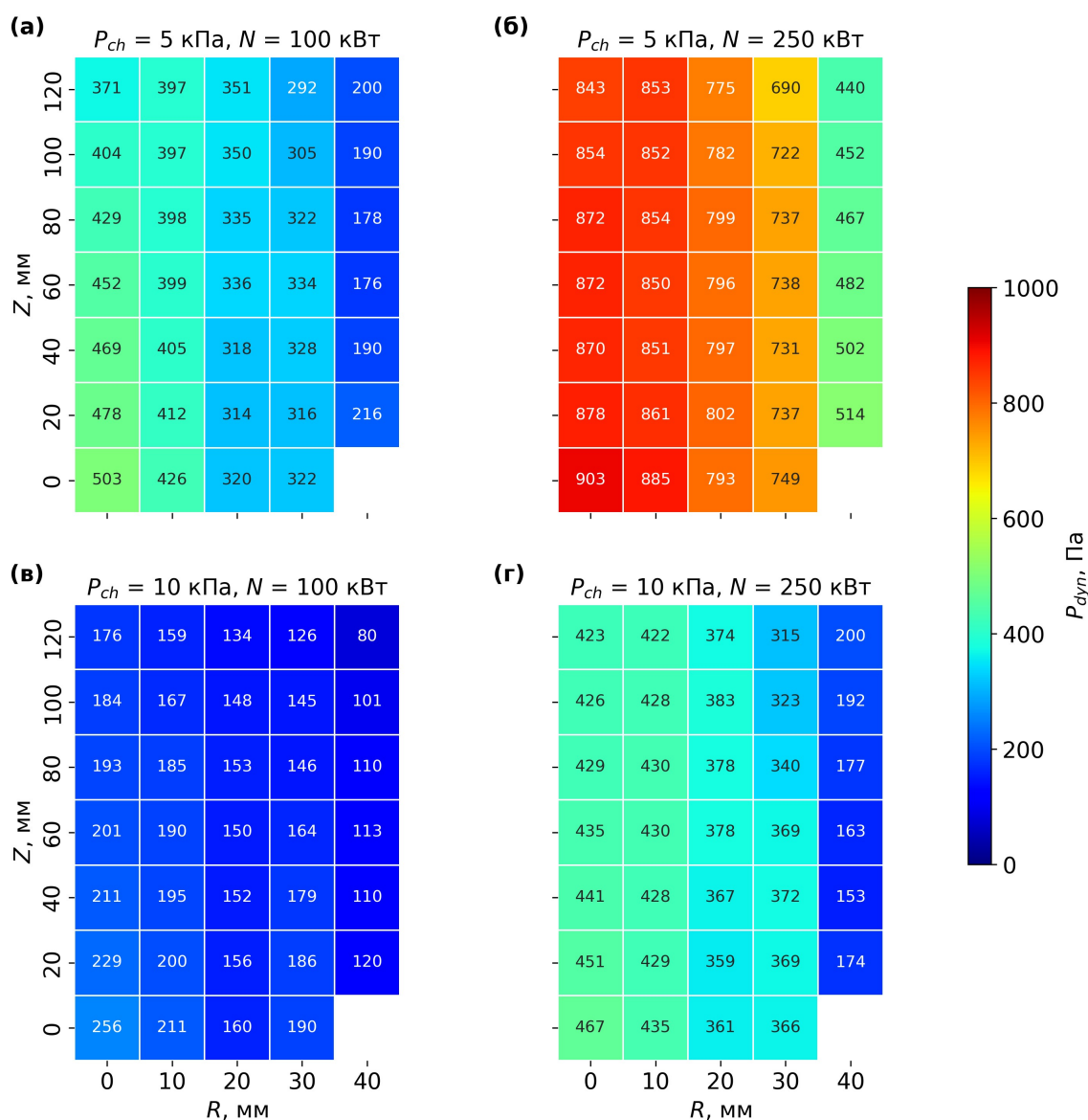


Рис. 3. Водоохлаждаемая трубка Пито – Прандтля: 1 – водоохлаждаемый корпус, 2 – отводящая трубка охлаждения, 3 – приемник полного давления, 4 – приемник статического давления, 5 – трубка полного давления, 6 – трубка статического давления



3.3. Тепловые потоки

Теплообмен в дозвуковой струе воздушной плазмы установки ВГУ-3 исследовался с помощью медного водоохлаждаемого цилиндрического зонда диаметром 20 мм (рис. 5) с плоским носком. Для измерений теплового потока в носовой части зонда устанавливался проточный стационарный калориметр [29, 30] с плоской тепловоспринимающей поверхностью из меди. Тепловоспринимающая поверхность калориметра перед каждой серией измерений полировалась и обрабатывалась спиртом. Диаметр тепловоспринимающей поверхности калориметра составлял 11,7 мм. Во всех экспериментах медная тепловоспринимающая поверхность калориметра предварительно окислялась в струе воздушной плазмы (до образования устойчивой оксидной пленки и выхода теплового потока на стационарное значение). Массовый расход охлаждающей воды в калориметрах контролировался поплавковым ротаметром, калибровка которого выполнялась непосредственно перед каждым экспериментом. Разность температур охлаждающей воды на выходе из калориметра и на входе в него измерялась экранированной дифференциальной термопарой типа Х-А.

Измеренные тепловые потоки в зависимости от давления в испытательной камере, мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию и положения калориметрического зонда в дозвуковой струе воздушной плазмы представлены на рис. 6. В рассмотренном интервале высот Z от 0 до 120 мм (относительно выходного сечения сопла) на оси сопла зарегистрированы тепловые потоки к холодной медной поверхности от 230 до 530 Вт/см². Максимальные тепловые потоки на оси сопла реализуются на расстоянии 20–40 мм от выходного сечения и далее постепенно снижаются по мере увеличения высоты Z . В работе [23] измерения в струе воздушной плазмы установки ВГУ-3 проводились для того же сопла, но с использованием калориметрического зонда диаметром 50 мм (с плоским носком и скругленными кромками), на холодной медной поверхности при мощности ВЧ-генератора от 100 до 300 кВт были реализованы тепловые потоки от 85 до 400 Вт/см² ($G = 11$ г/с, $Z = 60$ мм, $P_{ch} = 10$ кПа).

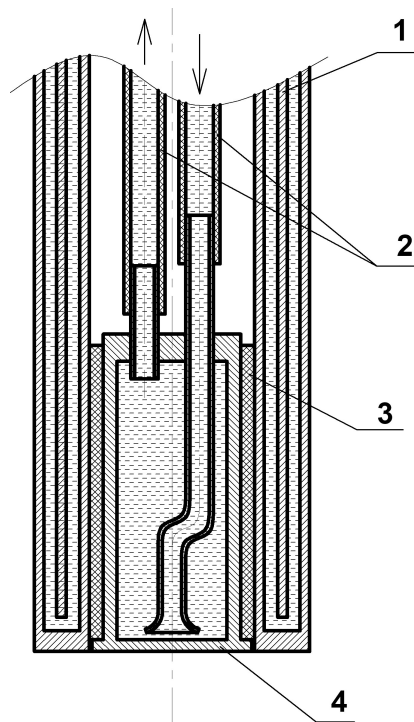


Рис. 5. Водоохлаждаемый калориметрический зонд диаметром 20 мм: 1 – водоохлаждаемый корпус, 2 – трубопроводы, 3 – теплоизолирующая фторопластовая втулка, 4 – проточный калориметр

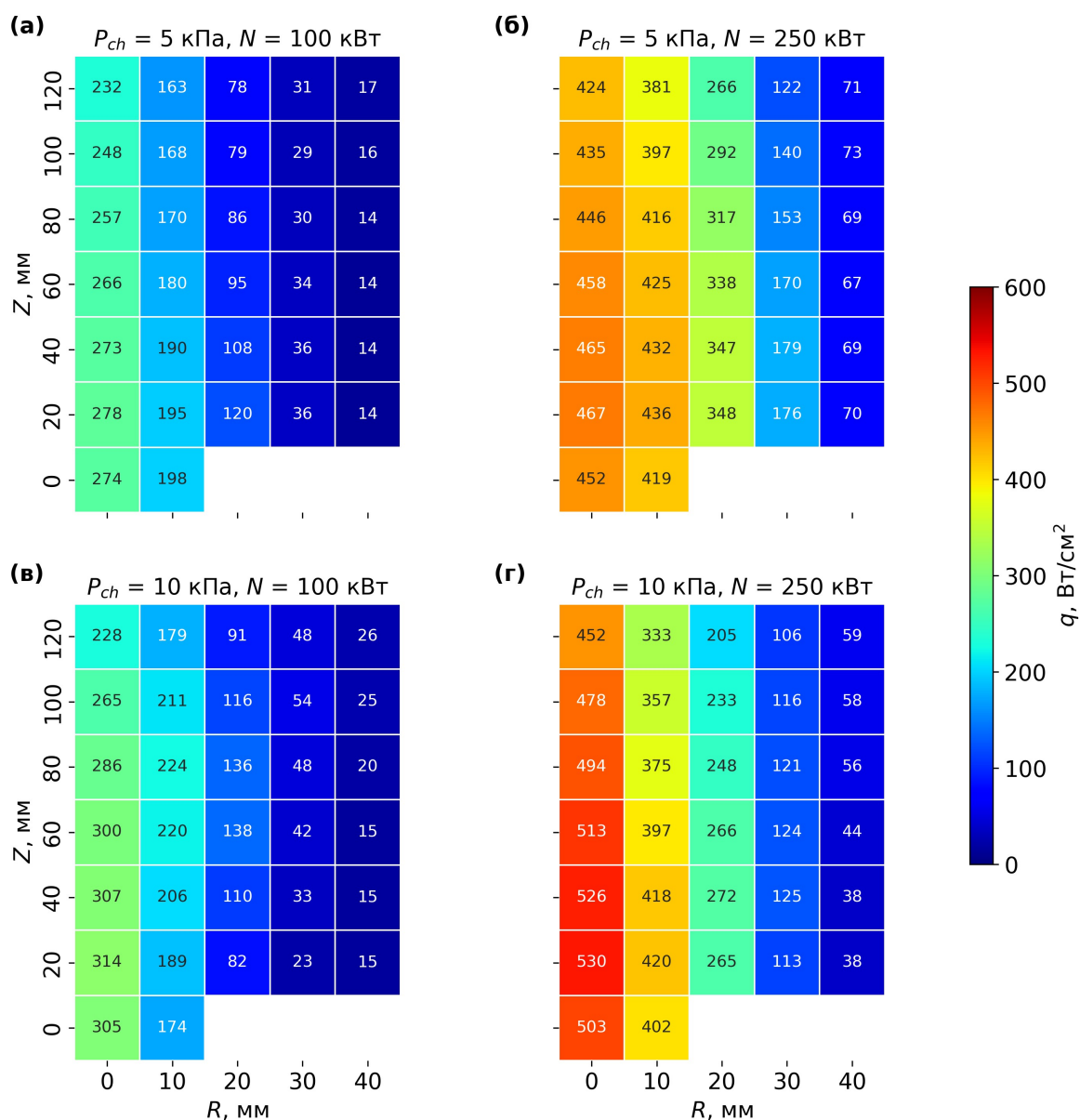


Рис. 6. Тепловые потоки q к холодной медной поверхности в дозвуковой струе воздушной плазмы установки ВГУ-3, истекающей из конического сопла с диаметром выходного сечения 80 мм, в зависимости от высоты лобовой части калориметрического зонда относительно выходного сечения сопла Z и смещения оси зонда относительно оси сопла R

4. Заключение

Выполнена серия диагностических экспериментов по исследованию режимов ВЧ-плазмотрона ВГУ-3 (ИПМех РАН), которые реализуются при истечении дозвуковой струи воздушной плазмы из водоохлаждаемого конического сопла с диаметром выходного сечения 80 мм. Полученные распределения тепловых потоков и динамических давлений в струе в зависимости от мощности установки и давления в испытательной камере могут быть использованы при дальнейшем планировании экспериментов, а также для валидации результатов численного моделирования течений индукционной плазмы. Измерения были проведены для области низких и средних мощностей ВЧ-генератора плазмотрона ВГУ-3 по анодному питанию (от 100 до 250 кВт), однако установленное слабое влияние конического сопла на температурный режим кварцевого разрядного канала (по сравнению с конфигурацией без сопла) позволяет перейти к исследованию режимов течений плазмы в области высоких (до 500-750 кВт) мощностей.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по теме гранта РФ 25-29-00178 «Экспериментальное и расчетное исследование режимов высокочастотного индукционного плазмотрона мегаваттного класса» с использованием ВЧ-плазмотрона ВГУ-3, который входит в состав уникальной научной установки РФ «Высокочастотные индукционные плазмтроны ВГУ-3 и ВГУ-4» (<http://www.ckp-rf.ru//usu/441568>). Авторы благодарят ведущего инженера ИПМех РАН И. В. Лукомского, изготовившего необходимую экспериментальную оснастку.

Литература

1. Залогин Г. Н., Землянский Б. А., Кнотко В. Б., Мурзинов И. Н., Румынский А. Н., Кузьмин Л. А. Высокочастотный плазмотрон – установка для исследований аэрофизических проблем с использованием высокоэнтальпийных газовых потоков // Космонавтика и ракетостроение. 1994. № 2. С. 22–32.
2. Егоров И. В., Жестков Б. Е., Шведченко В. В. Определение каталитической активности материалов при высоких температурах в гиперзвуковой трубе ВАТ-104 // Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45, № 1. С. 3–13.
3. Гордеев А. Н., Колесников А. Ф. Высокочастотные индукционные плазмтроны серии ВГУ // Сб. Актуальные проблемы механики: Физико-химическая механика жидкостей и газов. Москва, Наука. 2010. С. 151–177.
4. Loehle S., Zander F., Eberhart M., Hermann T., Meindl A., Massuti-Ballester B., Leiser D., Hufgard F., Pagan A.S., Herdrich G., Fasoulas S. Assessment of high enthalpy flow conditions for re-entry aerothermodynamics in the plasma wind tunnel facilities at IRS // CEAS Space J. 2022. Vol. 14. No. 2. Pp. 395–406. DOI: 10.1007/s12567-021-00396-y
5. Loehle S., Fasoulas S., Herdrich G. H., Hermann T.A., Massuti-Ballester B., Meindl A., Pagan A. S., Zander F. The Plasma Wind Tunnels at the Institute of Space Systems: Current Status and Challenges // 32nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Washington, D.C.: AIAA Paper 2016-3201. DOI: 10.2514/6.2016-3201
6. Herdrich G., Auweter-Kurtz M., Kurtz H. L., Laux T., Winter M. Operational Behavior of Inductively Heated Plasma Source IPG3 for Entry Simulations // J. Thermophys. Heat Transf. 2002. Vol. 16, № 3. Pp. 440–449. DOI: 10.2514/2.6698
7. El Rassi J., Holum S., Sombaert L., Viladegut A., Walpot L., Chazot O., Helber B. Upgraded VKI Plasmatron capabilities with supersonic nozzles for extended material characterization methods // SAMPE Journal. 2024. Vol. 60. No. 2. DOI: 10.33599/SJ.v60no2.02
8. Bottin B., Chazot O., Carbonaro M., Van Der Haegen V., Paris S. The VKI Plasmatron Characteristics and Performance // RTO EN-8. Rhode-Saint-Genese, 2000.
9. Bottin B., Paris S., Van Der Haegen V., Carbonaro M. Experimental and computational determination of the VKI Plasmatron operating envelope // 30th Plasmadynamic and Lasers Conference. Norfolk, VA, U.S.A.: AIAA Paper 99-3607. <https://doi.org/10.2514/6.1999-3607>
10. Capponi L., Oldham T., Konnik M., Stephani K., Bodony D.J., Panesi M., Elliott G. S., Panerai F. Aerothermal characterization of the Plasmatron X Wind Tunnel: Heat flux, Stagnation Pressure and Jet Unsteadiness // AIAA SCITECH 2023 Forum. National Harbor, MD: AIAA Paper 2023-1338. DOI: 10.2514/6.2023-1338
11. Greene B. R., Clemens N. T., Varghese P. L., Bouslog S., Del Papa S. V. Characterization of a 50kW inductively coupled plasma torch for testing of ablative thermal protection materials // 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. AIAA Paper 2017-0394. DOI: 10.2514/6.2017-0394
12. Uhl J., Owens W., Dougherty M., Lutz A., Meyers J., Fletcher D. Pyrolysis Simulation in an ICP Torch Facility // 42nd AIAA Thermophysics Conference. Honolulu, Hawaii: AIAA Paper 2011-3618. p 3618. DOI: 10.2514/6.2011-3618

13. Sun C., Li J., Li R., Wei Q. Measurement of antenna radiation patterns coated with plasma // AIP Adv. 2025. Vol. 15. No. 8. P. 085213. DOI: 10.1063/5.0287827
14. Ding F., Liu Y., Jia J., Li X., Li J., Zhao Y., Li R. Three-dimensional reconstruction of the emission field of the inductively coupled plasma jet // Phys. Plasmas. 2023. Vol. 30. No. 8. P. 083508. DOI: 10.1063/5.0147405
15. Fang S., Lin X., Zeng H., Zhu X., Zhou F., Yang J., Li F., Ou D., Yu X. Gas–surface interactions in a large-scale inductively coupled plasma wind tunnel investigated by emission/absorption spectroscopy // Phys. Fluids. 2022. Vol. 34. No. 8. P. 082113. DOI: 10.1063/5.0102274
16. Ito T., Ishida K., Mizuno M., Sumi T., Matsuzaki T., Nagai J., Murata H. 110kW New High Enthalpy Wind Tunnel Heated by Inductively-Coupled-Plasma // 12th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies. Norfolk, Virginia: AIAA Paper 2003-7023. DOI: 10.2514/6.2003-7023
17. Studer D., Vervisch P. Raman scattering measurements within a flat plate boundary layer in an inductively coupled plasma wind tunnel // J. Appl. Phys. 2007. Vol. 102. No. 3. P. 033303. DOI: 10.1063/1.2768067
18. Conte D., Sauvage N., Tran P., Vervisch P., Bourdon A., Desportes A. EADS-LV and CORIA Common Approach on Catalycity Measurement // Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Vehicles. 2003. Vol. 521. P. 313.
19. Herdrich G., Auweter-Kurtz M., Déportes A., Endlich P., Laux T., Van Ootegem B., Vervisch P. Experiments at the Inductively Heated Plasma Wind Tunnels of CORIA and IRS // 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. St. Louis, Missouri: AIAA Paper 2002-2711. DOI: 10.2514/6.2002-2711
20. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., Yakushin M. I. Induction plasma application to Buran's heat protection tiles ground tests // SAMPE Journal. 1992. Vol. 28. No. 3. Pp. 27–31.
21. Тимошенко В. П., Просунцов П. В., Резник С. В. Анализ теплового состояния конструкции орбитального корабля «Буран» в зонах возможного повреждения элементов теплозащитного покрытия // Известия вузов. Машиностроение. 2024. № 6 (771). С. 94–107.
22. 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. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/453/>
23. Колесников А. Ф., Васильевский С. А., Щелоков С. Л., Чаплыгин А. В., Галкин С. С. Анализ возможностей локального моделирования аэродинамического нагрева в мощном ВЧ-плазмотроне ВГУ-3 // Изв. РАН. МЖГ. 2022. № 6. С. 116–124.
24. Чаплыгин А. В., Васильевский С. А., Гордеев А. Н., Колесников А. Ф. Новые режимы теплообмена в высокочастотном мегаваттном индукционном плазмотроне ВГУ-3 // Сборник трудов в 4 томах XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Т. 2: Механика жидкости и газа. Уфа: РИЦ БашГУ. 2019. С. 921–922.
25. Чаплыгин А. В., Васильевский С. А., Галкин С. С., Колесников А. Ф. Тепловое состояние неохлаждаемого кварцевого разрядного канала мощного высокочастотного индукционного плазмотрона // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/990/>
26. Gordeev A. N., Pershin I. S., Yakushin M. I. Heat Regimes of Quartz Discharge Channel of Powerful Induction Plasmotron IPG-3-200 // Environmental Testing for Space Programmes. 1997. Vol. 408. P. 189.
27. Touloukian Y. S., DeWitt D. P. Thermophysical properties of matter. The TPRC data series. Vol. 8. Thermal radiative properties-nonmetallic solids. 1972.
28. Петунин А. Н. Методы и техника измерения параметров газового потока (приемники давления и скоростного напора). М.: Машиностроение. 1972. 332 с.

29. ASTM E422-05 Standard Test Method for Measuring Heat Flux Using a Water-Cooled Calorimeter. American Society for Testing and Materials, 2011. DOI: 10.1520/E0422-05
30. Галкин С. С., Колесников А. Ф., Сахаров В. И., Чаплыгин А. В. Исследование влияния формы модели на конвективные тепловые потоки к холодной каталитической поверхности в сверхзвуковых струях диссоциированного воздуха в ВЧ-плазматроне // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2021. Т. 22, вып. 3. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-3/articles/941/>

References

1. Zalogin G. N., Zemljanskij B. A., Knot'ko V. B., Murzinov I. N., Rumynskij A. N., Kuz'min L. A., High-frequency plasmatron – a facility for researching aerophysical problems using high-enthalpy gas flows, *Space and rocket science*, 1994, no. 2, pp. 22–32. [in Russian].
2. Egorov I. V., Zhestkov B. E., Shvedchenko V. V., Determination of material catalycity at high temperatures in the VAT-104 hypersonic wind tunnel, *TsAGI Science Journal*, 2014, vol. 45, iss. 1. pp. 3–13. DOI: 10.1615/TsAGISciJ.2014011332
3. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., High-frequency induction plasmatrons of the VGU series, *Actual problems in mechanics: Physical and chemical mechanics of liquids and gases*. Moscow: Nauka publ., 2010, pp. 151–177 [in Russian].
4. Loehle S., Zander F., Eberhart M., Hermann T., Meindl A., Massuti-Ballester B., Leiser D., Hufgard F., Pagan A.S., Herdrich G., Fasoulas S., Assessment of high enthalpy flow conditions for re-entry aerothermodynamics in the plasma wind tunnel facilities at IRS, *CEAS Space J*, 2022, vol. 14, no. 2, pp. 395–406. DOI: 10.1007/s12567-021-00396-y
5. Loehle S., Fasoulas S., Herdrich G. H., Hermann T.A., Massuti-Ballester B., Meindl A., Pagan A. S., Zander F., The Plasma Wind Tunnels at the Institute of Space Systems: Current Status and Challenges, AIAA Paper 2016-3201. DOI: 10.2514/6.2016-3201
6. Herdrich G., Auweter-Kurtz M., Kurtz H. L., Laux T., Winter M., Operational Behavior of Inductively Heated Plasma Source IPG3 for Entry Simulations, *J. Thermophys. Heat Transf.*, 2002. vol. 16, no. 3, pp. 440–449. DOI: 10.2514/2.6698
7. El Rassi J., Holum S., Sombaert L., Viladegut A., Walpot L., Chazot O., Helber B., Upgraded VKI Plasmatron capabilities with supersonic nozzles for extended material characterization methods, *SAMPE Journal*, 2024, vol. 60, no. 2. DOI: 10.33599/SJ.v60no2.02
8. Bottin B., Chazot O., Carbonaro M., Van Der Haegen V., Paris S., The VKI Plasmatron Characteristics and Performance, *RTO EN-8*, Rhode-Saint-Genese, 2000.
9. Bottin B., Paris S., Van Der Haegen V., Carbonaro M., Experimental and computational determination of the VKI Plasmatron operating envelope, AIAA Paper 99-3607. <https://doi.org/10.2514/6.1999-3607>
10. Capponi L., Oldham T., Konnik M., Stephani K., Bodony D.J., Panesi M., Elliott G. S., Panerai F., Aerothermal characterization of the Plasmatron X Wind Tunnel: Heat flux, Stagnation Pressure and Jet Unsteadiness, AIAA Paper 2023-1338. DOI: 10.2514/6.2023-1338
11. Greene B. R., Clemens N. T., Varghese P. L., Bouslog S., Del Papa S. V., Characterization of a 50kW inductively coupled plasma torch for testing of ablative thermal protection materials, AIAA Paper 2017-0394. DOI: 10.2514/6.2017-0394
12. Uhl J., Owens W., Dougherty M., Lutz A., Meyers J., Fletcher D., Pyrolysis Simulation in an ICP Torch Facility, AIAA Paper 2011-3618. DOI: 10.2514/6.2011-3618
13. Sun C., Li J., Li R., Wei Q., Measurement of antenna radiation patterns coated with plasma, *AIP Adv.*, 2025, vol. 15, no 8, p. 085213. DOI: 10.1063/5.0287827
14. Ding F., Liu Y., Jia J., Li X., Li J., Zhao Y., Li R., Three-dimensional reconstruction of the emission field of the inductively coupled plasma jet, *Phys. Plasmas.*, 2023, vol. 30, no. 8. p. 083508. DOI: 10.1063/5.0147405

15. Fang S., Lin X., Zeng H., Zhu X., Zhou F., Yang J., Li F., Ou D., Yu X., Gas–surface interactions in a large-scale inductively coupled plasma wind tunnel investigated by emission/absorption spectroscopy, *Phys. Fluids.*, 2022, vol. 34, no. 8. p. 082113. DOI: 10.1063/5.0102274
16. Ito T., Ishida K., Mizuno M., Sumi T., Matsuzaki T., Nagai J., Murata H., 110kW New High Enthalpy Wind Tunnel Heated by Inductively-Coupled-Plasma, AIAA Paper 2003-7023. DOI: 10.2514/6.2003-7023
17. Studer D., Vervisch P., Raman scattering measurements within a flat plate boundary layer in an inductively coupled plasma wind tunnel, *J. Appl. Phys.*, 2007, vol. 102, no. 3. p. 033303. DOI: 10.1063/1.2768067
18. Conte D., Sauvage N., Tran P., Vervisch P., Bourdon A., Desportes A., EADS-LV and CORIA Common Approach on Catalycity Measurement, *Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Vehicles*, 2003, vol. 521. p. 313.
19. Herdrich G., Auweter-Kurtz M., Déportes A., Endlich P., Laux T., Van Ootegem B., Vervisch P., Experiments at the Inductively Heated Plasma Wind Tunnels of CORIA and IRS, AIAA Paper 2002-2711. DOI: 10.2514/6.2002-2711
20. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., Yakushin M. I., Induction plasma application to Buran’s heat protection tiles ground tests, *SAMPE Journal*, 1992, vol. 28, no. 3, pp. 27–31.
21. Tymoshenko V. P., Prosuntsov P. V., Reznik S. V., Analysis of the thermal state of the Buran orbital spacecraft structure in areas of possible damage to the heat shield coating, *Izvestiya VUZov. Mechanical Engineering*, 2024, no. 6 (771), pp. 94–107 [in Russian].
22. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., New regimes of plasma flows and heat transfer in the IPG-4 plasmatron, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2008, vol. 7 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2008-7/articles/453/>
23. Kolesnikov A. F., Vasil’evskii S. A., Shchelokov S. L., Chaplygin A. V., Galkin S. S., Analysis of the Possibilities of Local Simulation of Aerodynamic Heating in a Powerful VGU-3 HF-Plasmatron, *Fluid Dyn.*, 2022, no. 57, pp. 811–819. DOI: 10.1134/S0015462822601309
24. Chaplygin A. V., Vasil’evskii S. A., Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., New heat transfer regimes in a high-frequency 1MW induction plasmatron VGU-3, *XII all-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics*, vol. 2, Ufa, 2019. Pp. 921-922. [in Russian]
25. Chaplygin A. V., Vasil’evskii S. A., Galkin S. S., Kolesnikov A. F., Thermal state of uncooled quartz discharge channel of powerful high-frequency induction plasmatron, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, iss. 2 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/990/>
26. Gordeev A. N., Pershin I. S., Yakushin M. I., Heat Regimes of Quartz Discharge Channel of Powerful Induction Plasmotron IPG-3-200, *Environmental Testing for Space Programms*, 1997, vol. 408. p. 189.
27. Touloukian Y. S., DeWitt D. P. Thermophysical properties of matter, *The TPRC data series*, vol. 8. Thermal radiative properties-nonmetallic solids, 1972.
28. Petunin A. N., *Methods and techniques for measuring gas flow parameters (Tubes for pressure and velocity head)*, Moscow: Mashinostroenie, 1972, 332 pp. [in Russian].
29. ASTM E422-05 Standard Test Method for Measuring Heat Flux Using a Water-Cooled Calorimeter, *American Society for Testing and Materials*, 2011. DOI: 10.1520/E0422-05
30. Galkin S. S., Kolesnikov A. F., Sakharov V. I., Chaplygin A. V. Investigation of influence of model geometry on convective heat transfer to cold catalytic surface in supersonic dissociated air flows in HF-plasmatron, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2021, vol. 22, iss. 3 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-3/articles/941/>

Статья поступила в редакцию 10 октября 2025 г.