

Gasdynamics Aspects of the Heat Transfer Experiment with the UHTC Surface in Under-Expanded Dissociated Air Jet

A. F. Kolesnikov¹, V. I. Sakharov²

¹ *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Moscow, 119526, Russia*

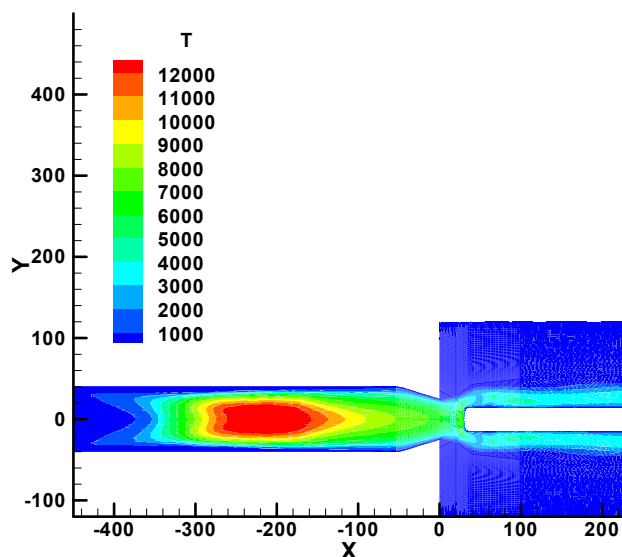
² *Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119192, Russia*

koles@ipmnet.ru, sakharov@imec.msu.ru

Abstract

For the conditions of the experiment in supersonic under-expanded jet of high-enthalpy air with ceramic samples $\text{HfB}_2\text{-30vol.\%SiC}$ and $(\text{HfB}_2\text{-30vol.\%SiC})\text{-2vol.\%C}_G$, the numerical method in the framework of the Navier – Stokes equations and simplified Maxwell equations was used to simulate the air plasma flow in the discharge channel of the plasmatron and the flow of under-expanded jet of dissociated air around a cylindrical holder with a ceramic samples. The effective recombination coefficients of N and O atoms are determined for $\text{HfB}_2\text{-30vol.\%SiC}$ и $(\text{HfB}_2\text{-30vol.\%SiC})\text{-2vol.\%C}_G$ surfaces at 1716 K и 1750 K wall temperatures through comparison of measured and calculated stagnation point heat fluxes.

Keywords: HF-plasmatron, dissociated air, under-expanded jet, heat transfer, UHTC.



Calculated temperature field of supersonic dissociated air flow around a model with a ceramic sample

УДК 533.6.011.8

Газодинамические аспекты эксперимента по теплообмену поверхности ультравысокотемпературной керамики в недорасширенной струе диссоциированного воздуха

А. Ф. Колесников¹, В. И. Сахаров²

¹ *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлунского Российской академии наук,
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1,*

² *Научно-исследовательский Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект д.1,*

koles@ipmnet.ru, sakharov@imec.msu.ru

Аннотация

Для условий эксперимента на индукционном ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) в сверхзвуковой струе высокоэнтальпийного воздуха численным методом в рамках уравнений Навье – Стокса и упрощенных уравнений Максвелла выполнено моделирование течения плазмы воздуха в разрядном канале плазмотрона и обтекания недорасширенной струей диссоциированного воздуха цилиндрической державки с керамическим образцом. Представлены поля газодинамических параметров и анализируется сложная картина струйного обтекания модели неравновесно диссоциированным многокомпонентным воздухом. Из сопоставления экспериментальных и расчетных данных по тепловым потокам в центре керамических образцов определены эффективные коэффициенты рекомбинации атомов N и O на поверхностях составов HfB₂-30об.%SiC и (HfB₂-30об.%SiC)-2об.%C_G при температурах 1716 и 1750 К.

Ключевые слова: ВЧ-плазмотрон, диссоциированный воздух, недорасширенная струя, теплообмен, ультравысокотемпературная керамика.

1. Введение

В настоящее время активно рассматриваются возможности применения ультравысокотемпературных керамических материалов (УНТК) при создании наиболее теплонагруженных элементов летательных аппаратов [1–6]. Данная работа дополняет цикл публикаций [6–10], затрагивающих вопросы теплообмена образцов ультра-высокотемпературных керамик на основе HfB₂-SiC в сверхзвуковых струях диссоциированных газов (азота и воздуха) и анализ состояния керамической поверхности после термохимического воздействия высокоэнтальпийного газового потока. В дополнение к результатам исследования теплообмена образцов керамики состава HfB₂-30об.%SiC и (HfB₂-30об.%SiC)-2об.%C_G в сверхзвуковом потоке диссоциированного воздуха [9] здесь представлены результаты численного моделирования полей течения многокомпонентной химически неравновесной воздушной плазмы в разрядном канале и в барокамере ВЧ-плазмотрона ВГУ-4. Представленные данные о газодинамических параметрах обтекания цилиндрической модели с установленным образцом керамики сильно неоднородной недорасширенной струей диссоциированного воздуха необходимы при сопоставлении экспериментальных результатов по теплообмену и состоянию поверхности керамики после термохимических испытаний с другими экспериментами.

2. Эксперимент на плазмотроне ВГУ-4

Теплообмен и поведение керамических материалов $\text{HfB}_2\text{-30об.}\%\text{SiC}$ и $(\text{HfB}_2\text{-30об.}\%\text{SiC})\text{-2об.}\%\text{C}_G$ при обтекании образцов сверхзвуковыми недорасширенными струями диссоциированного воздуха исследовались в [9]. Эксперименты проведены на 100-киловаттном высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4 [11] при истечении недорасширенной высокосубзвуковой струи воздуха из водоохлаждаемого конического сопла с диаметром выходного сечения $D_s = 50$ мм при давлении в барокамере установки 8.5 гПа и расходе воздуха в разрядном канале 3.6 г/с. Цилиндрические образцы ультравысокотемпературной керамики $\text{HfB}_2\text{-SiC}$ и модифицированной 2 об.% графена диаметром 15 мм и толщиной $3.1 \div 3.7$ мм устанавливались в носовой части водоохлаждаемой медной цилиндрической модели диаметром 30 мм (рис. 1). Расстояние от среза сопла до образца составляло 30 мм. В экспериментах длительностью 10 мин мощность ВЧ-генератора плазмотрона 64 кВт поддерживалась постоянной.

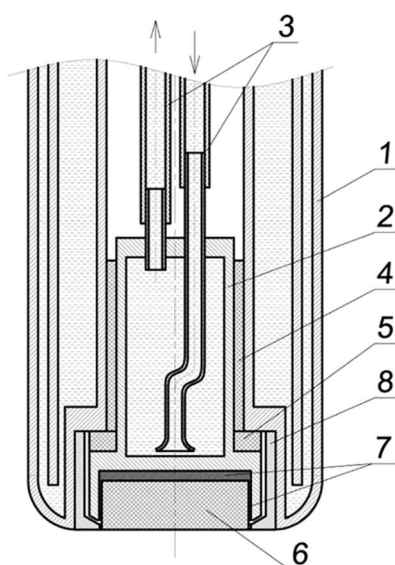


Рис. 1. Схема закрепления керамического образца [7]: 1 – водоохлаждаемая медная державка, 2 – водоохлаждаемый калориметр, 3 – водяные трубопроводы, 4 – фторопластовая теплоизолирующая втулка, 5 – теплоизолирующая шайба, 6 – образец из керамики, 7 – высокотемпературная теплоизоляция, 8 – экранирующая втулка

Измерения цветовой температуры поверхности нагретого образца выполнялись пирометром спектрального отношения Mikron M770S. Поля температур на поверхности образца регистрировались термовизором Тандем VS-415U. Подробные результаты измерений температур поверхности керамических образцов приведены в [9]. Методика определения теплового потока к лицевой поверхности образца детально описана в [7]. В табл. 1 приведены значения тепловых потоков к нагретым поверхностям образцов, полученные в экспериментах.

Таблица 1

Экспериментальные значения тепловых потоков и цветовой температуры в центре лицевой поверхности образцов [9]

Образец	T_w , К	Тепловой поток, Вт/см ²
$\text{HfB}_2\text{-30об.}\%\text{SiC}$	1750	120
$(\text{HfB}_2\text{-30об.}\%\text{SiC})\text{-2об.}\%\text{C}_G$	1716	111

3. Численное моделирование

Нагрев образца материала в высокоэнтальпийном потоке диссоциированного воздуха существенно зависит от каталитической активности поверхности по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов N и O. Эффективность этих поверхностных процессов характеризуется коэффициентами каталитической рекомбинации γ_N и γ_O , которые могут изменяться в интервале от 0 до 1. В нашем подходе при количественной оценке каталитичности поверхности эффективный коэффициент γ определяется по измеренному тепловому потоку в критической точке модели из расчетной зависимости $q_w(\gamma)$ в предположении, что $\gamma_N = \gamma_O = \gamma$.

Для условий экспериментов на установке ВГУ-4 [9] проведено численное моделирование неравновесного течения плазмы воздуха в разрядном канале, в истекающих недорасширенных струях воздушной плазмы и при обтекании державки с образцом. Геометрия расчетной области и использованные расчетные методы аналогичны применявшимся в [10, 12] для керамических образцов, нагретых в сверхзвуковых струях азотной и воздушной плазмы. Расчет основан на комплексе программ численного интегрирования уравнений Навье – Стокса [13].

Для решения задачи в рамках модели сплошной среды использован авторский комплекс программ NIGHTEMP [14] численного интегрирования уравнений Навье – Стокса и специальных программ-генераторов, взаимодействующих с базами данных по термодинамическим и переносным свойствам индивидуальных газовых веществ. Система нестационарных уравнений Навье – Стокса в квазитрехмерном приближении решается численно на структурированной криволинейной сетке методом конечного объема. Система конечно-разностных уравнений состоит из численных аналогов уравнений сохранения для четырехугольных ячеек, покрывающих расчетную область, и разностных аппроксимаций граничных условий. Методом конечного объема определяется приближенное решение – значения физических переменных (давления, температуры, вектора скорости, концентраций компонентов) в центре каждой ячейки и в центре каждой стороны ячейки, примыкающей к твердой стенке. Невязкие численные потоки через стороны ячейки вычисляются по результату решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва. Граничные значения определяются по лимитированным одномерным экстраполяционным формулам вектора искомых переменных от центров ячеек к центрам сторон. Численные значения вязких потоков через стороны ячеек определяются по центральному и односторонним разностным формулам второго порядка точности. Разностные уравнения решаются с помощью двухслойной неявной итерационной схемы, основанной на неявной аппроксимации нестационарных уравнений Навье – Стокса. В конструкции неявного итерационного оператора используется расщепление Якобианов численных потоков с учетом знаков собственных значений. Приближенное обращение неявного оператора реализовывалось методом последовательной релаксации Гаусса – Зейделя в линиях с применением LU-разложения блочно-тридиагональных матриц при решении уравнений на каждой линии.

На рис. 2–4 приведены поля чисел Маха, температур и давлений соответственно, полученные в результате численного моделирования. Давление приведено в гПа, температура – в градусах К, а все расстояния даны в мм.

Расчетные зависимости плотности, температуры, тепловых потоков в точке торможения в зависимости от эффективного коэффициента поверхностной рекомбинации атомов γ , а также измеренное значение теплового потока [9] приведены на рис. 5. Из сравнения приведенных расчетных и экспериментальных данных по тепловым потокам следует что в условиях эксперимента [9] поверхности образцов керамики HfB_2 -30об.%SiC и $(\text{HfB}_2$ -30об.%SiC)-2об.%C_G при температурах 1716 ÷ 1750 К проявляют себя как низкокatalитичные. Имея это в виду, данные образцы керамики могут рассматриваться как эталонные при сравнительном анализе каталитических свойств других материалов.

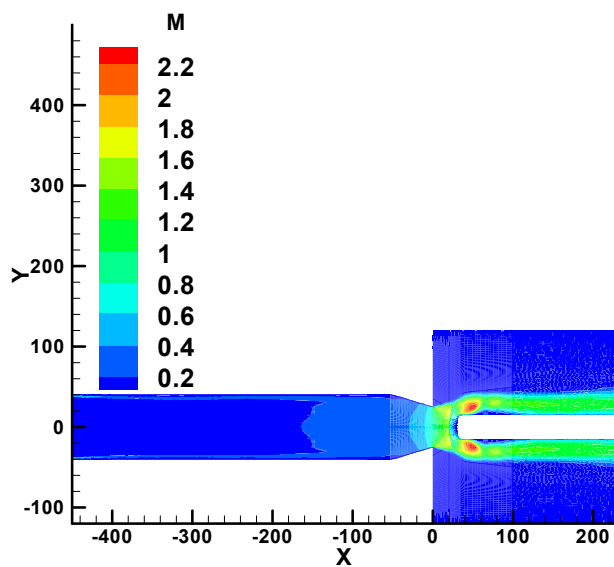


Рис. 2. Поле чисел Маха

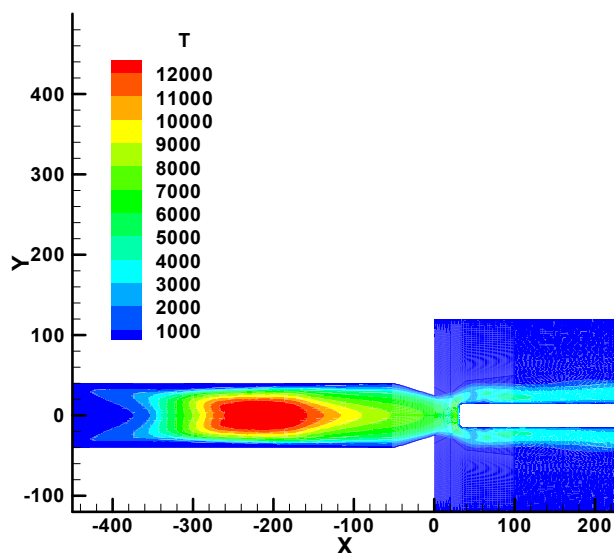


Рис. 3. Поле температур

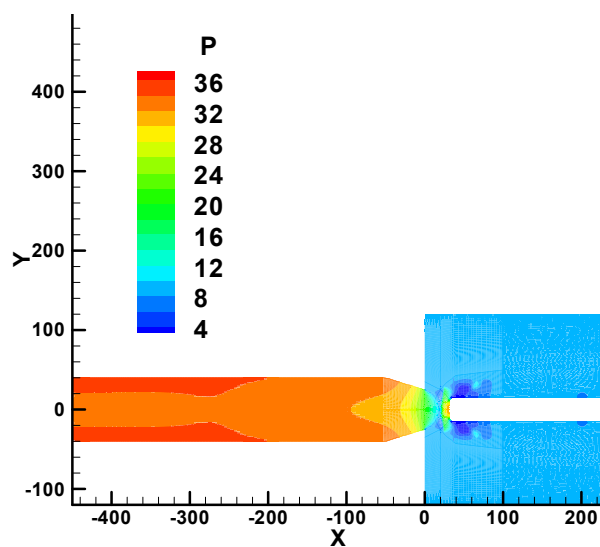


Рис. 4. Поле давлений

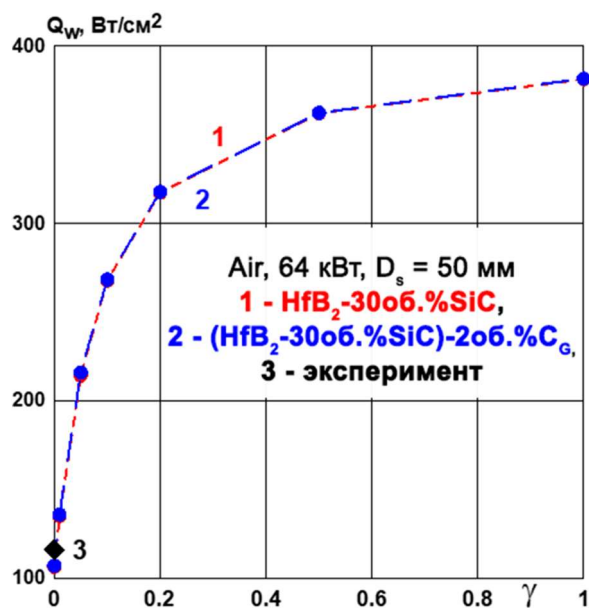


Рис. 5. Тепловой поток в точке торможения на керамическом образце [9]

4. Заключение

Выполнено численное исследование течений и теплообмена образцов ультра-высокотемпературной керамики для условий эксперимента [9], реализованном на 100-киловаттном ВЧ-плазмотроне ВГУ-4. В дополнение к экспериментальным данным [9] представлены сложные картины течения плазмы воздуха в разрядном канале плазмотрона и обтекания сверхзвуковой струей диссоциированного воздуха цилиндрической державки с керамическим образцом. Расчетная плотность теплового потока 100 Вт/см² при $\gamma = 0$ соответствует экспериментальным значениям тепловых потоков к поверхности керамических материалов HfB₂-30об.%SiC и (HfB₂-30об.%SiC)-2об.%C₆.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по теме государственных заданий ИПМех РАН (№ госрегистрации АААА-А20-120011690135-5) и Института Механики МГУ (№ госрегистрации АААА-А16-116021110205-0) при частичной поддержке гранта РФФИ № 20-01-00056. ВЧ-плазмотрон ВГУ-4 (ИПМех РАН) входит в состав уникальной научной установки РФ «Высокочастотные индукционные плазмтроны ВГУ-3 и ВГУ-4» (<http://www.ckp-rf.ru/usu/441568>).

Литература

1. Squire T. H., Marschall J. Material property requirements for analysis and design of UHTC components in hypersonic applications // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2010. – Т. 30. – № 11. – С. 2239–2251.
2. Savino R., Criscuolo L., Di Martino G. D., Mungiguerra S. Aero-thermo-chemical characterization of ultra-high-temperature ceramics for aerospace applications // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2018. – Т. 38. – № 8. – С. 2937–2953.
3. Fahrenheit W. G., Wuchina E. J., Lee W. E., Zhou Y. Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environment applications. John Wiley & Sons, 2014. – 464 p.
4. Justin J. F., Jankowiak A. Ultra High Temperature Ceramics: Densification, Properties and Thermal Stability // *Aerospace Lab*. – 2011. – № 3. – С. 1–11.

5. Simonenko E. P., Sevast'yanov D. V., Simonenko N. P., Sevast'yanov V. G., Kuznetsov N. T. Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2013. – Т. 58. – № 14. – С. 1669–1693.
6. Simonenko E.P., Simonenko N.P., Kolesnikov A.F., Chaplygin A.V., Lysenkov A.S., Nagornov I.A., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T. Modification of HfB₂–30% SiC UHTC with Graphene (1 vol %) and Its Influence on the Behavior in a Supersonic Air Jet // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2021. – Vol. 66. – № 9. – Pp. 1405–1415.
7. Kolesnikov A.F., Kuznetsov N.T., Muravyeva T.I., Nagornov I.A., Sakharov V.I., Sevastyanov V.G., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Chaplygin A.V., Shcherbakova O.O. Investigation of Heat Transfer to HfB₂-SiC-Based Ceramics in Underexpanded Dissociated Nitrogen Flows and Analysis of the Surface // *Fluid Dynamics*. – 2022. – Т. 57. – № 4. – С. 513–523.
8. Simonenko E.P., Simonenko N.P., Kolesnikov A.F., Chaplygin A.V., Lysenkov A.S., Nagornov I.A., Simonenko T. L., Gubin S. P., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T. Oxidation of graphene-modified HfB₂-SiC ceramics by supersonic dissociated air flow // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2022. – Т. 42. – № 1. – С. 30–42.
9. Simonenko E.P., Simonenko N.P., Kolesnikov A.F., Chaplygin A.V., Sakharov V.I., Lysenkov A.S., Nagornov I.A., Kuznetsov N.T. Effect of 2 vol % graphene additive on heat transfer of ceramic material in underexpanded jets of dissociated air // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. – 2022. – Т. 67. – № 12. – С. 2050–2061.
10. Колесников А.Ф., Сахаров В.И., Чаплыгин А.В. Экспериментальное и численное моделирование теплообмена поверхности ультравысокотемпературной керамики в недорасширенных струях диссоциированного азота // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2022. Т.23, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-1/articles/979/>
11. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Индукционные плазмотроны серии ВГУ // В сб. «Актуальные проблемы механики. Физико-химическая механика жидкостей и газов». М.: Наука, 2010. – С. 151–177.
12. Васильевский С.А., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Сахаров В.И., Симоненко Е.П., Симоненко Н.П. Экспериментальное и численное исследование теплообмена высокоэнтальпийных потоков воздуха с цилиндрическими моделями из меди и с образцами из керамики на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2018. Т. 19, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-1/articles/731/>
13. Сахаров В. И. Численное моделирование термически и химически неравновесных течений и теплообмена в недорасширенных струях индукционного плазмотрона // *Известия РАН. Механика жидкости и газа*. – 2007. – № 6. – С. 157–168.
14. Afonina N. E., Gromov V. G., Sakharov V. I. HIGHTEMP technique of high temperature gas flows numerical simulations // *Proc. 5th Europ. Symp. on Aerothermodyn. Spase Vehicles*. Cologne, Germany, 2004. SP 563. Noordwijk: ESTEC, 2004. – Pp. 323–328.

References

1. Squire T. H., Marschall J., Material property requirements for analysis and design of UHTC components in hypersonic applications, *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, vol. 30, no. 11, pp. 2239–2251.
2. Savino R., Criscuolo L., Di Martino G. D., Mungiguerra S., Aero-thermo-chemical characterization of ultra-high-temperature ceramics for aerospace applications, *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, vol. 38, no. 8, pp. 2937–2953.
3. Fahrenheit W. G., Wuchina E. J., Lee W. E., Zhou Y., *Ultra-high temperature ceramics: materials for extreme environment applications*, John Wiley & Sons, 2014, 464 p.

4. Justin J. F., Jankowiak A., Ultra High Temperature Ceramics: Densification, Properties and Thermal Stability, *Aerospace Lab.*, 2011, no. 3, pp. 1–11.
5. Simonenko E. P., Sevast'yanov D. V., Simonenko N. P., Sevast'yanov V. G., Kuznetsov N. T., Promising ultra-high-temperature ceramic materials for aerospace applications, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2013, vol. 58, no. 14, pp. 1669–1693.
6. Simonenko E. P., Simonenko N. P., Kolesnikov A. F., Chaplygin A. V., Lysenkov A. S., Nagornov I. A., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T., Modification of HfB₂–30% SiC UHTC with Graphene (1 vol %) and Its Influence on the Behavior in a Supersonic Air Jet, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, vol. 66, no. 9, pp. 1405–1415.
7. Kolesnikov A. F., Kuznetsov N. T., Muravyeva T. I., Nagornov I. A., Sakharov V. I., Sevastyanov V. G., Simonenko E. P., Simonenko N. P., Chaplygin A. V., Shcherbakova O. O., Investigation of Heat Transfer to HfB₂-SiC-Based Ceramics in Underexpanded Dissociated Nitrogen Flows and Analysis of the Surface, *Fluid Dynamics*, 2022, vol. 57, no. 4, pp. 513–523.
8. Simonenko E. P., Simonenko N. P., Kolesnikov A. F., Chaplygin A. V., Lysenkov A. S., Nagornov I. A., Simonenko T. L., Gubin S. P., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T., Oxidation of graphene-modified HfB₂-SiC ceramics by supersonic dissociated air flow, *Journal of the European Ceramic Society*, 2022, vol. 42, no. 1, pp. 30–42.
9. Simonenko E. P., Simonenko N. P., Kolesnikov A. F., Chaplygin A. V., Sakharov V. I., Lysenkov A. S., Nagornov I. A., Kuznetsov N. T., Effect of 2 vol % graphene additive on heat transfer of ceramic material in underexpanded jets of dissociated air, *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, vol. 67, no. 12, pp. 2050–2061.
10. Kolesnikov A. F., Sakharov V. I., Chaplygin A. V., Experimental and numerical simulation of the heat transfer of the UHTC surface in under-expanded dissociated nitrogen jets, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, iss. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-1/articles/979/> [in Russian]
11. Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., *Indukcionnye plazmotrony serii VGU* (Induction plasmatrons of the VGU series), V sb. «Aktual'nye problemy mehaniki. Fiziko-himicheskaja mehanika zhidkostej i gazov», M.: Nauka, 2019, pp. 151–177 [in Russian].
12. Vasilevsky S. A., Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., Sakharov V. I., Simonenko E. P., Simonenko N. P., Experimental and numerical study of heat transfer to cylindrical copper models and HfB₂-SiC ceramic samples in high-enthalpy air jets using RF-plasmatron IPG-4, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2018, vol. 19, iss. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2018-19-1/articles/731/> [in Russian]
13. Sakharov V. I., Numerical simulation of thermally and chemically nonequilibrium flows in underexpanded induction plasmatron jets, *Fluid Dynamics*, 2007, vol. 42, no. 6, pp. 1007–1016.
14. Afonina N. E., Gromov V. G., Sakharov V. I., HIGHTEMP technique of high temperature gas flows numerical simulations, *Proc. 5th Europ. Symp. on Aerothermodyn. Spase Vehicles*, Cologne, Germany, 2004. SP 563. Noordwijk: ESTEC, 2004, pp. 323–328.

Статья поступила в редакцию 13 декабря 2022 г.