

Graphite Ablation in Subsonic Dissociated Flows of Nitrogen, Carbon Dioxide, their Mixture and under Laser Surface Heating

A. V. Chaplygin, M. Yu. Yakimov, S. A. Vasil'evskii, I. V. Lukomskii,
S. S. Galkin, M. A. Kotov, A. N. Shemyakin, N. G. Solovyov, A. F. Kolesnikov

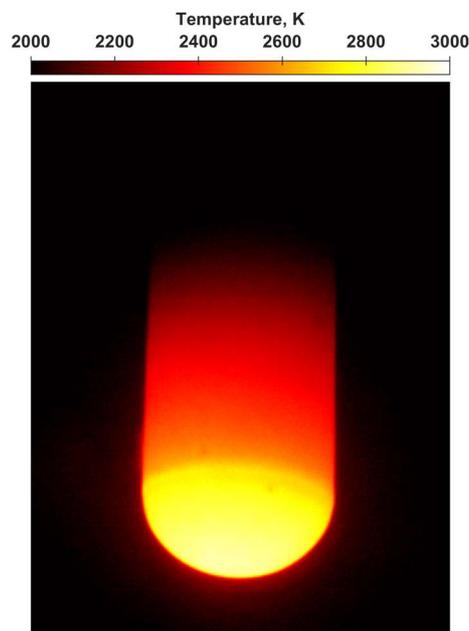
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russia*

chaplygin@ipmnet.ru

Abstract

Graphite ablation in subsonic jets of dissociated nitrogen, carbon dioxide and their mixture was studied using VGU-4 RF plasmatron. A laser source was used for additional radiative heating of the samples. Numerical modeling was done for subsonic flows of nitrogen and carbon dioxide plasma under experimental conditions using the Navier-Stokes equations. Heat fluxes in high-enthalpy jets were measured by probe and plasma emission spectra were collected for the experimental regimes. The behavior of graphite when heated only by laser radiation in nitrogen environment, heated in nitrogen plasma and combined heated was studied. The effect of high-enthalpy flow chemical composition and heating conditions on the graphite mass loss was demonstrated.

Keywords: graphite, ablation, plasma, laser heating.



Thermal image of a graphite sample heated in a plasma flow

УДК 533.6.011.8

Абляция графита в дозвуковых диссоциированных потоках азота, углекислого газа, их смеси и при лазерном нагреве поверхности

**А. В. Чаплыгин, М. Ю. Якимов, С. А. Васильевский, И. В. Лукомский,
С. С. Галкин, М. А. Котов, А. Н. Шемякин, Н. Г. Соловьев,
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

В ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 исследована абляция графита в дозвуковых струях диссоциированного азота, углекислого газа и их смеси. Для дополнительного радиационного нагрева образцов использовался источник лазерного излучения. Проведено численное моделирование дозвуковых течений плазмы азота и углекислого газа для режимов экспериментов на основе уравнений Навье–Стокса. Выполнены зондовые измерения тепловых потоков в высокоэнтальпийных струях и зарегистрированы спектры излучения плазмы для режимов экспериментов. Изучено поведение графита при нагреве только лазерным излучением в среде азота, нагреве только в плазме азота и при комбинированном нагреве. Показано влияние химического состава высокоэнтальпийного потока и условий нагрева на массовый унос графита.

Ключевые слова: графит, абляция, плазма, лазерный нагрев.

1. Введение

Углеродные материалы применяются в аэрокосмической отрасли, в том числе при создании элементов тепловой защиты для возвращаемых космических аппаратов и планетных зондов [1–3]. Прогноз поведения тепловой защиты при входе в атмосферу требует экспериментальных данных об абляции углерода и материалов на его основе в химически активных высокоэнтальпийных газовых потоках. Для межпланетных миссий необходимы испытания в газовых средах, моделирующих состав атмосферы, отличной от воздушной (например, в плазме CO_2 , N_2/CO_2 , $\text{Ar}/\text{N}_2/\text{CO}_2$ для атмосферы Марса или плазме N_2 , N_2/CH_4 для атмосферы Титана). Доминирующий механизм разрушения углеродного материала зависит от температуры поверхности, параметров и химического состава набегающего потока. Выделяют кинетический, диффузионный и сублимационный режимы разрушения углеродного материала [4,5]. К потере массы материала за счет химических реакций наряду с окислением [6–8] может приводить процесс нитрирования углерода атомарным азотом [9–11]. Слабо изучены механизмы спалляции углерода при высокотемпературном нагреве [12,13].

В ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) ранее исследовался унос массы углеродных материалов в потоке чистого диссоциированного азота [14]. Экспериментально и численно изучен теплообмен графита в недорасширенных струях плазмы азота [15]. В [16] за счет дополнительного лазерного нагрева на поверхности графита реализована температура более 3850 К и наблюдалась сублимация углерода в дозвуковом потоке плазмы азота.

Целью данной работы было исследовать абляцию графита в потоках индукционной плазмы разного химического состава (азота, углекислого газа и их смеси), а также изучить особенности поведения образцов из графита, нагреваемых разными способами: в дозвуковом потоке плазмы, под действием лазерного излучения с обдувом поверхности холодным газом и в комбинированном режиме с одновременным воздействием на поверхность индукционной плазмы и лазерного излучения.

2. Материалы и методы

Все эксперименты проводились в ВЧ-плазматроне ВГУ-4 (ИПМех РАН) с подведенной мощностью 100 кВт [17]. Для лазерного нагрева поверхности использовались источники Raycus RFL-C1500 мощностью 1500 Вт (рабочая длина волны 1.080 ± 0.005 мкм) и IPG Photonics YLPN-1-100-200-R мощностью 200 Вт, характеристики которого приведены в [18].

Исследовались образцы из мелкозернистого графита МПГ-7 плотностью не менее 1.8 г/см^3 . Все образцы были выполнены из одной заготовки. Образцы взвешивались до и после экспериментов на аналитических весах ВЛ-124В с погрешностью ± 0.0003 г. Линейные размеры образцов измерялись штангенциркулем с погрешностью ± 0.05 мм. Унос массы определялся как $\Delta m = m_0 - m_1$ (m_0 – масса образца до эксперимента; m_1 – масса образца после воздействия). Линейный унос определялся как $\Delta l = l_0 - l_1$ (l_0 – длина исходного цилиндрического образца, измеренная вдоль оси симметрии; l_1 – длина образца, измеренная вдоль той же оси после воздействия).

Давление в барокамере установки ВГУ-4 контролировалось с помощью датчика Элемер АИР-20/М2-ДА с точностью измерения $\pm 0.2\%$. Расход рабочих газов задавался электронными ротаметрами Bronkhorst MV-306 с точностью измерения $\pm 2\%$. В работе использовались азот (N_2) ОСЧ 5.0 (99.999 %) и двуокись углерода (CO_2) ГОСТ 8050-85 (99.8 %).

Измерение температуры в центре лицевой поверхности образцов осуществлялось яркостным пирометром AST Swift 350 PL в спектральном интервале от 1.9 до 2.6 мкм (с максимальной чувствительностью на длине волны 2.3 мкм). В показания пирометра вносилась поправка на пропускание оптического окна из КС1 (0.93) и поправка, учитывающая спектральную излучательную способность поверхности в рабочем спектральном интервале (ε_λ). Для оценки ε_λ были проведены предварительные эксперименты с образцами из графита МПГ-7 в виде цилиндров диаметром 30 мм с плоским носком, которые нагревались в потоках плазмы чистого азота и углекислого газа. Спектральная излучательная способность поверхности определялась из сравнения показаний яркостного пирометра AST Swift 350 PL с результатами измерений цветовой температуры пирометром спектрального отношения Mikron M770S (этот подход описан в [19,20]). В потоке плазмы чистого азота спектральная излучательная способность поверхности графита МПГ-7 составила $\varepsilon_\lambda = 0.91$ (при цветовой температуре $T_c = 2850$ К). В потоке плазмы углекислого газа спектральная излучательная способность поверхности графита МПГ-7 составила $\varepsilon_\lambda = 0.80$ (при цветовой температуре $T_c = 2670$ К). Полученные значения излучательной способности согласуются с литературными данными для графитовых материалов [21, 22]. Однако, с учетом достаточно низкой точности применявшегося метода оценки излучательных свойств, температуры образцов во всех представленных далее экспериментах для простоты анализа результатов приводятся с единой поправкой $\varepsilon_\lambda = 0.9$.

Распределения температур на лицевой поверхности образцов были получены с помощью термовизора «Тандем VS-415U». В показания термовизора вносилась поправка на пропускание оптического окна (0.93). Дополнительная поправка, учитывающая спектральную излучательную способность поверхности образца на рабочей длине волны термовизора 0.65 мкм, не вводилась.

Референсные тепловые потоки к холодной высококаталитической стенке для режимов экспериментов в дозвуковых плазменных струях разного химического состава измерялись с помощью проточного калориметра с тепловоспринимающей поверхностью из меди. Калориметр устанавливался в водоохлаждаемую цилиндрическую медную модель диаметром 20 мм со сферическим носком (конструкция калориметра и модели приведена в [16]). Массовый расход охлаждающей воды в калориметре измерялся с помощью ультразвукового расходомера Bronkhorst ES-FLOW с точностью $\pm 2\%$. Изменение температуры воды в калориметре измерялось с помощью дифференциальной термопары типа X-A.

Спектры излучения плазмы за выходным сечением сопла регистрировались спектрометром HR4000 (Ocean Optics) в интервале длин волн от 200 до 1050 нм. Относительная калибровка спектрометра выполнена с помощью комбинированного источника излучения DN-2000-CAL. Схема измерений аналогична [16]. При анализе атомарных спектров использовалась база данных [23].

Численное моделирование дозвуковых течений плазмы (азота и углекислого газа) осуществлялось в программном комплексе, разработанном в Лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с материалами ИПМех РАН (коды «Alpha» и «Beta»). Расчеты выполнялись на основе двумерных уравнений Навье – Стокса для дозвукового осесимметричного течения химически и термически равновесного частично диссоциированного и ионизованного газа в предположении стационарного ламинарного течения, излучение плазмы не учитывалось.

3. Эксперименты в дозвуковых струях плазмы N_2 , CO_2 и смеси N_2/CO_2

Схема представленных в § 3 экспериментов в целом соответствует описанной в [24], но отличается форма образцов и способ их закрепления в водоохлаждаемой державке. Образцы из графита МПГ-7 имели форму цилиндров диаметром 20 мм со сферическим носком и устанавливались в цилиндрической державке диаметром 20 мм аналогично [16]. Расстояние от выходного сечения конического сопла диаметром $D = 30$ мм, установленного за разрядным каналом плазмотрона, до поверхности образца составляло $z = 30$ мм. Эксперименты проведены при давлении в испытательной камере $p_{ch} = 1 \times 10^4$ Па и постоянном массовом расходе плазмообразующего газа $G = 2.4$ г/с в высокоэнтальпийных потоках 100% N_2 , 100% CO_2 и смеси 75% $N_2 + 25\%CO_2$ (по массе). Мощность ВЧ-генератор плазмотрона по анодному питанию составляла $N_{ap} = 70$ кВт.

3.1. Режимы течения

Тепловые потоки к холодной медной поверхности, измеренные в струях плазмы установки ВГУ-4 при постоянной мощности ВЧ-генератора по анодному питанию $N_{ap} = 70$ кВт, постоянном массовом расходе $G = 2.4$ г/с и различном составе плазмообразующего газа, представлены на рис. 1. Максимальный тепловой поток реализован в N_2 -плазме, минимальный – в CO_2 -плазме, в первую очередь это связано с изменением КПД (η) ВЧ-плазмотрона. В дальнейших расчетах принимались значения $\eta = 0.61$ (для N_2) и $\eta = 0.51$ (для CO_2). Кроме того, в [25] отмечалось, что в дозвуковых струях диссоциированного углекислого газа медь не проявляет себя как эталонный высококаталитический материал по отношению к гетерогенной рекомбинации CO и O, и максимальные тепловые потоки могут быть зарегистрированы датчиком с тепловоспринимающей поверхностью из серебра.

Спектры излучения плазмы, зарегистрированные за выходным сечением сопла, в зависимости от состава плазмообразующего газа представлены на рис. 2. Интенсивность излучения N_2 -плазмы и CO_2 -плазмы ниже, чем смесей N_2/CO_2 . В спектрах смесей N_2/CO_2 отмечено выраженное излучение фиолетовой системы CN. На рис. 3 отдельно приведены спектры излучения плазмы N_2 и CO_2 . В струе N_2 -плазмы присутствует атомарный азот N ($\lambda = 821; 869$ нм), что указывает на возможность нитрирования углерода при нагреве в потоке.

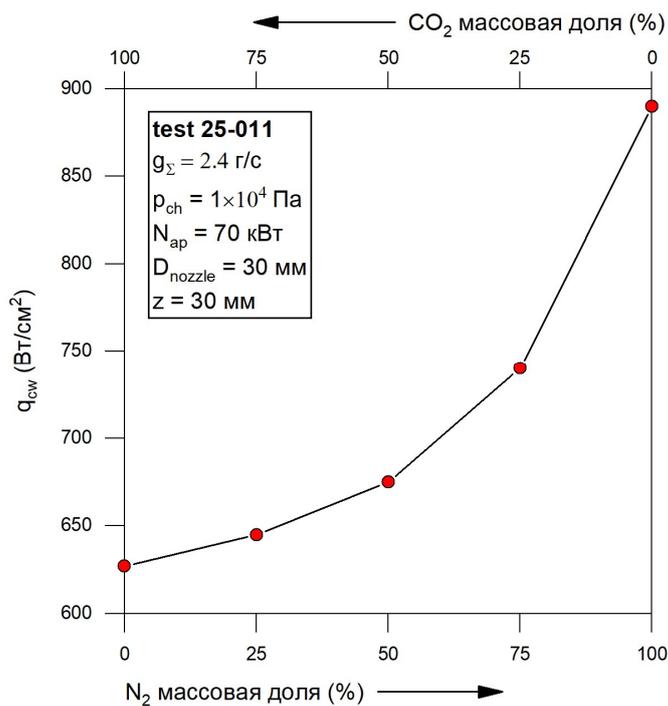


Рис. 1. Тепловой поток к холодной медной поверхности (q_{cw}) при различной массовой доле N_2 и CO_2 в составе плазмообразующего газа

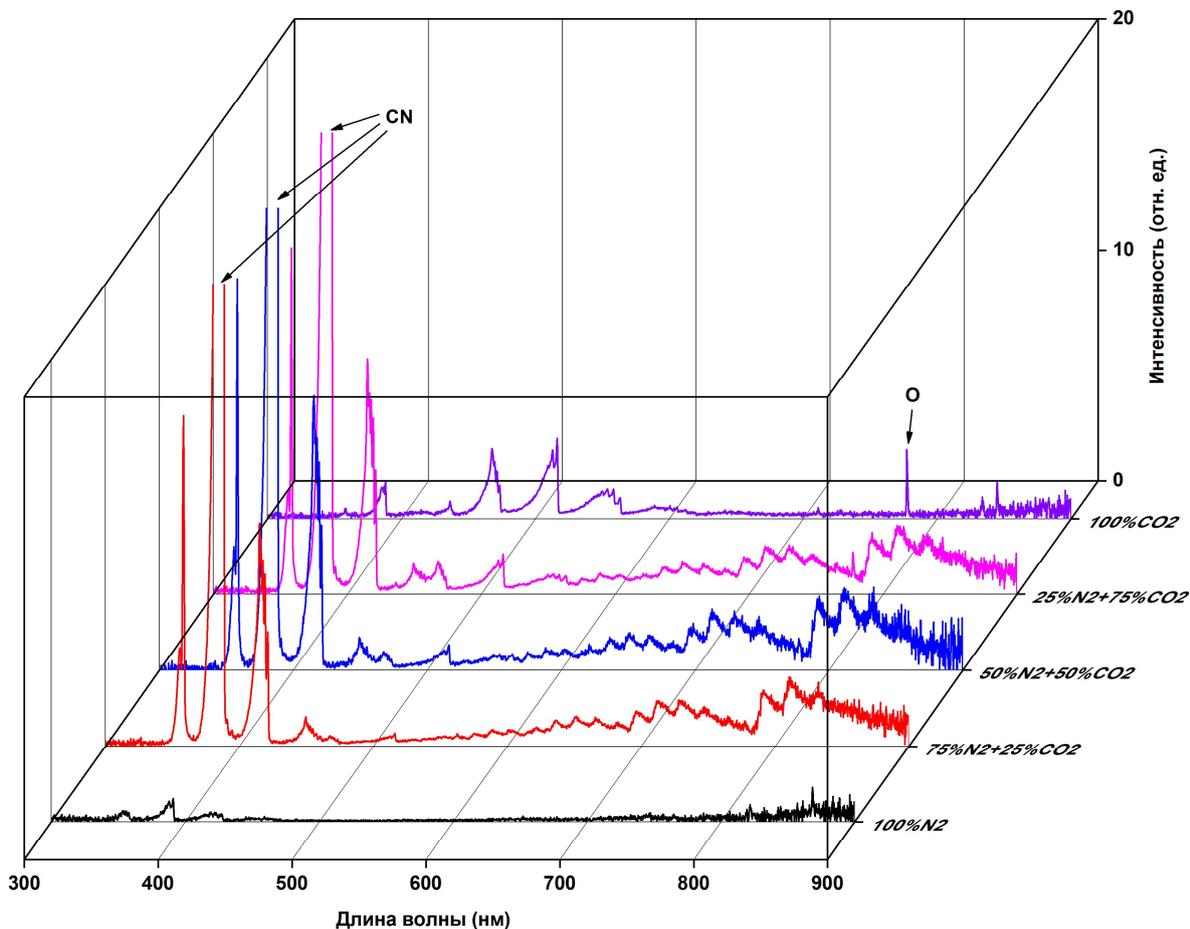


Рис. 2. Спектры излучения плазмы за выходным сечением конического сопла диаметром $D = 30$ мм в зависимости от состава газа ($N_{ap} = 70$ кВт, $p_{ch} = 1 \times 10^4$ Па, $G = 2.4$ г/с)

В то же время, в спектре излучения N_2 -плазмы не наблюдаются характерные кислородные линии ($\lambda = 777; 845$ нм), т.е. в экспериментах не происходил нежелательный подмес воздуха в струю азота, что потенциально могло привести к дополнительной потере массы образцов за счет окисления. В спектре излучения CO_2 -плазмы идентифицированы линии атомов O ($\lambda = 777; 845$ нм), C ($\lambda = 711; 833$ нм) и характерные полосы молекулы C_2 (полосы Свана).

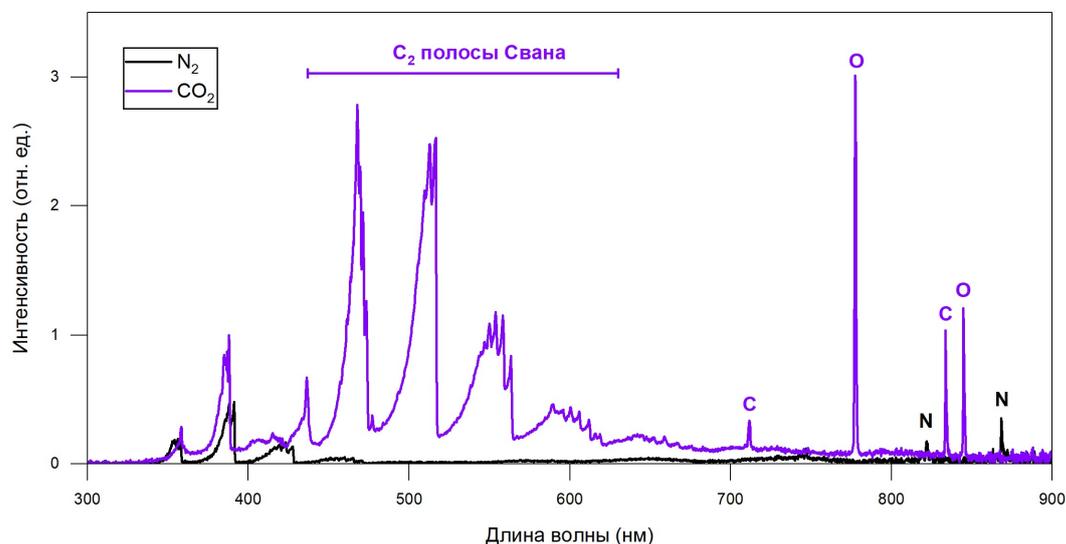


Рис. 3. Спектры излучения плазмы N_2 и CO_2 за выходным сечением конического сопла диаметром $D = 30$ мм ($N_{ap} = 70$ кВт, $p_{ch} = 1 \times 10^4$ Па, $G = 2.4$ г/с)

Численное моделирование течения в разрядном канале ВЧ-плазмотрона и в пространстве испытательной камеры было выполнено для плазмы CO_2 и N_2 . Уравнения Навье – Стокса решались с использованием метода контрольных объемов и алгоритма SIMPLE Патанкара и Сполдинга [26, 27]. Графики радиальных профилей параметров плазмы на выходе из конического сопла приведены на рис. 4.

Графики распределения параметров диссоциированного газа вдоль оси симметрии на участке от выходного сечения сопла ($z = 0$ мм) до поверхности образца ($z = 30$ мм) приведены на рис. 5. Более низкие расчетные значения температуры и энтальпии потока в струе CO_2 согласуются с данными проведенных калориметрических измерений.

3.2. Результаты экспериментов в дозвуковых струях плазмы N_2 , CO_2 и смеси N_2/CO_2

Всего испытано 6 образцов из графита МПГ-7 в виде цилиндров со сферическим носком. Время воздействия во всех случаях составляло 60 с. Эксперименты проведены в диссоциированных потоках 100% N_2 , 100% CO_2 , 75% N_2 + 25% CO_2 (по массе). В каждой среде выполнено по 2 эксперимента: 1) без дополнительного лазерного нагрева поверхности; 2) с дополнительным лазерным нагревом поверхности при максимальной интенсивности подведенного лазерного излучения $I_{incident} = 1440$ Вт/см² (источник Raucus RFL-C1500). Таким образом, при постоянных параметрах высокоэнтальпийного набегающего потока исследовано поведение материала для двух значений температуры поверхности. Зависимости от времени температуры T в окрестности лобовой точки показаны на рис. 6. Дополнительный лазерный нагрев позволил увеличить температуру на 490 К в потоке 100% CO_2 , на 540 К в смеси 75% N_2 + 25% CO_2 и на 660 К в потоке 100% N_2 . Большой прирост температуры поверхности, зарегистрированный при дополнительном лазерном нагреве образца в плазме азота, может быть связан с меньшей скоростью уноса материала горячей стенки (что влияет на тепловой баланс) и с ростом коэффициента поглощения лазерного излучения при нагреве графита в этой среде.

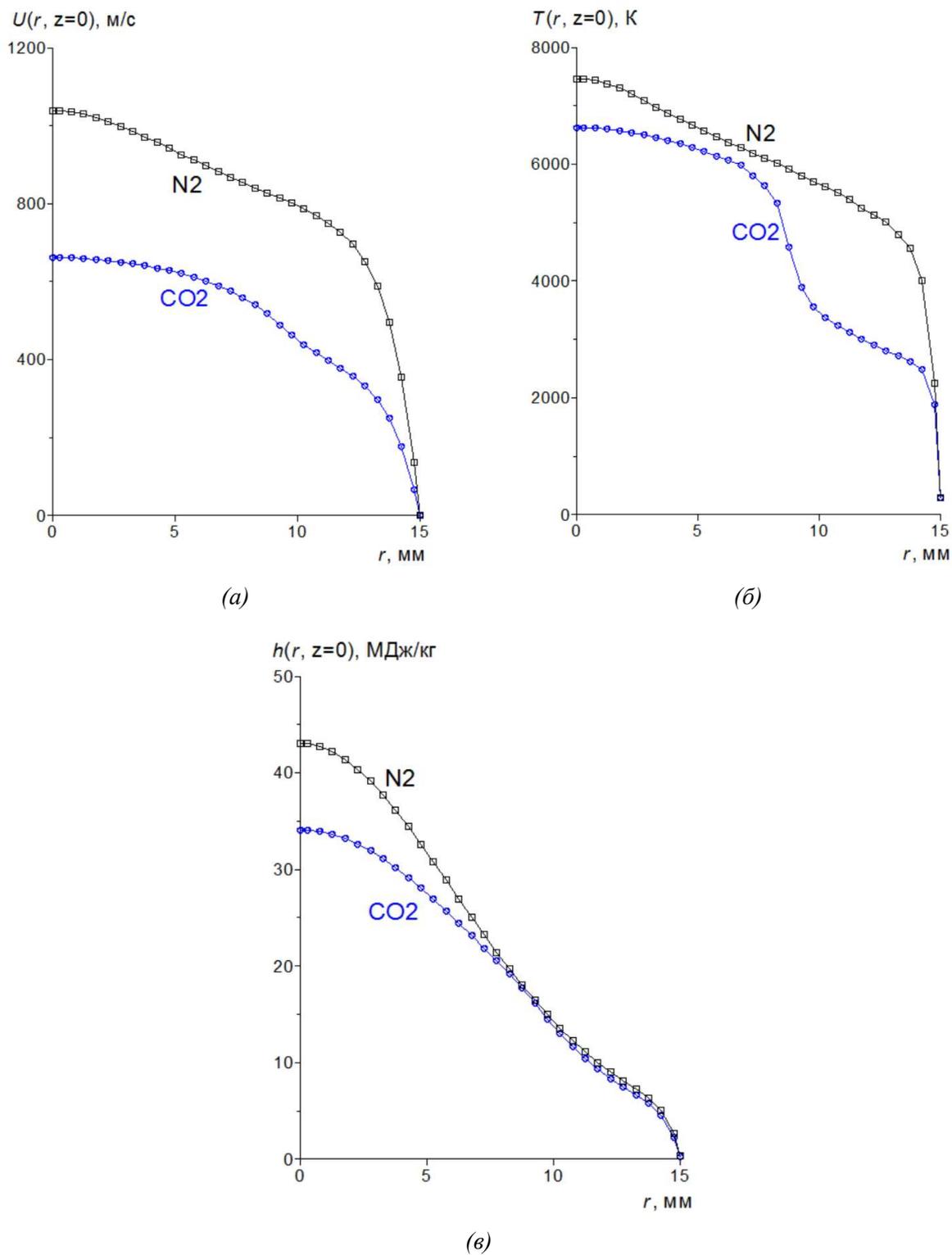


Рис. 4. Радиальные профили скорости (а), температуры (б) и энтальпии (в) плазмы на выходе из конического сопла диаметром $D = 30$ мм ($N_{ap} = 70$ кВт, $p_{ch} = 1 \times 10^4$ Па, $G = 2.4$ г/с)

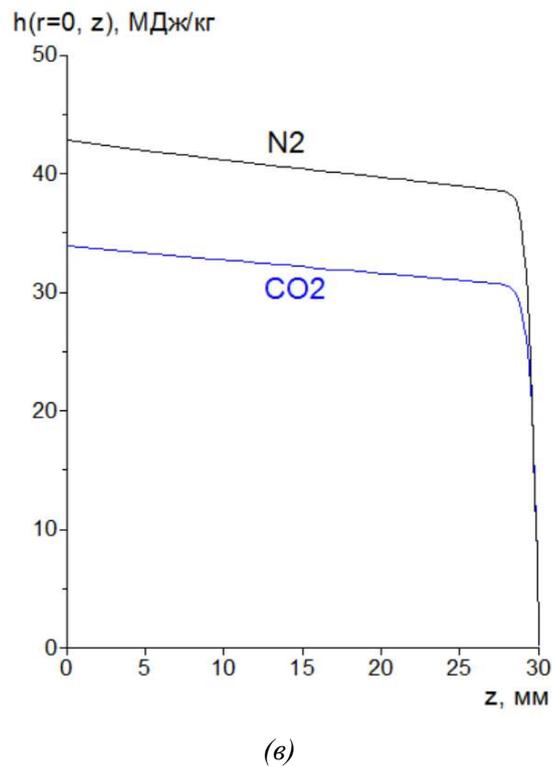
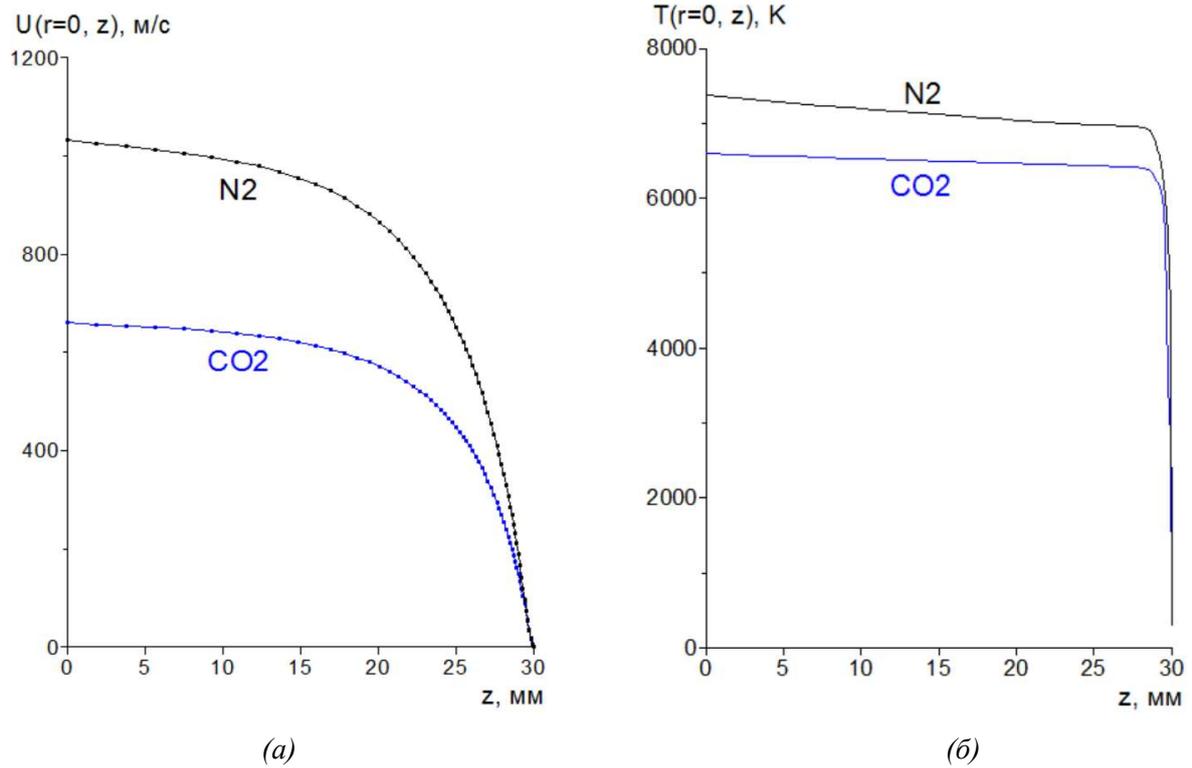


Рис. 5. Распределения скорости (а), температуры (б) и энтальпии (в) диссоциированного газа на оси симметрии между выходным сечением сопла ($z = 0$ мм) и поверхностью образца ($z = 30$ мм) ($N_{ap} = 70$ кВт, $p_{ch} = 1 \times 10^4$ Па, $G = 2.4$ г/с)

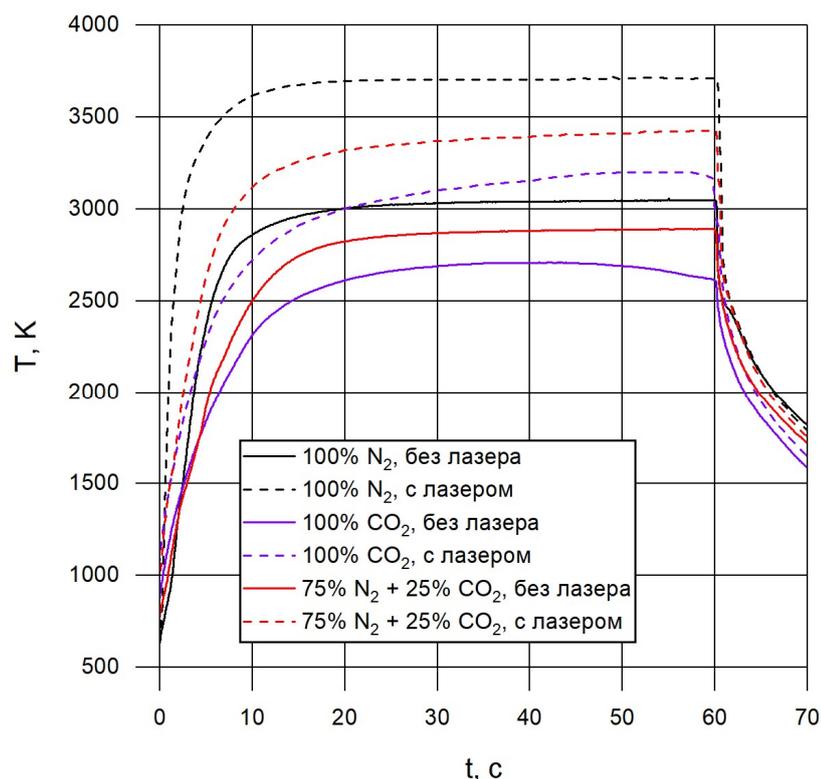


Рис. 6. Зависимости от времени температуры (T) в окрестности лобовой точки образцов из графита МПГ-7, зарегистрированные яркостным пирометром при воздействии потоков плазмы разного химического состава в экспериментах с дополнительным лазерным нагревом поверхности (штриховые линии) и без дополнительного лазерного нагрева поверхности (сплошные линии)

Термоизображения образцов на последней секунде воздействия для всех экспериментов приведены на рис. 7. Отмечен локальный рост температуры на лобовой поверхности образцов в экспериментах с дополнительным лазерным нагревом.

Обобщенные результаты экспериментов представлены в Таблице 1. Максимальная абляция графита наблюдалась в потоке 100% CO_2 , минимальная – в потоке 100% N_2 . Рост скорости абляции графита в кислородосодержащих средах (100% CO_2 и 75% N_2 + 25% CO_2) связан со значительным вкладом реакций окисления в процесс химического уноса углерода, по сравнению с нитрированием углерода в атомарном азоте. При этом увеличение максимальной температуры поверхности T_{max} за счет дополнительного лазерного нагрева не приводит к существенному изменению потери массы образцов Δm , что характерно для диффузионного режима уноса углерода, в котором скорость уноса определяется скоростью диффузии компонент химических реакций к поверхности. В эксперименте с лазерным нагревом поверхности в потоке плазмы азота отмечено резкое увеличение линейного уноса Δl материала, который измерялся вдоль оси симметрии начального цилиндрического образца. Это связано с образованием в лобовой части образца (вблизи оси симметрии) кратера из-за начала сублимации углеродного материала в пятне лазерного излучения, где температура поверхности достигала 3720 К.

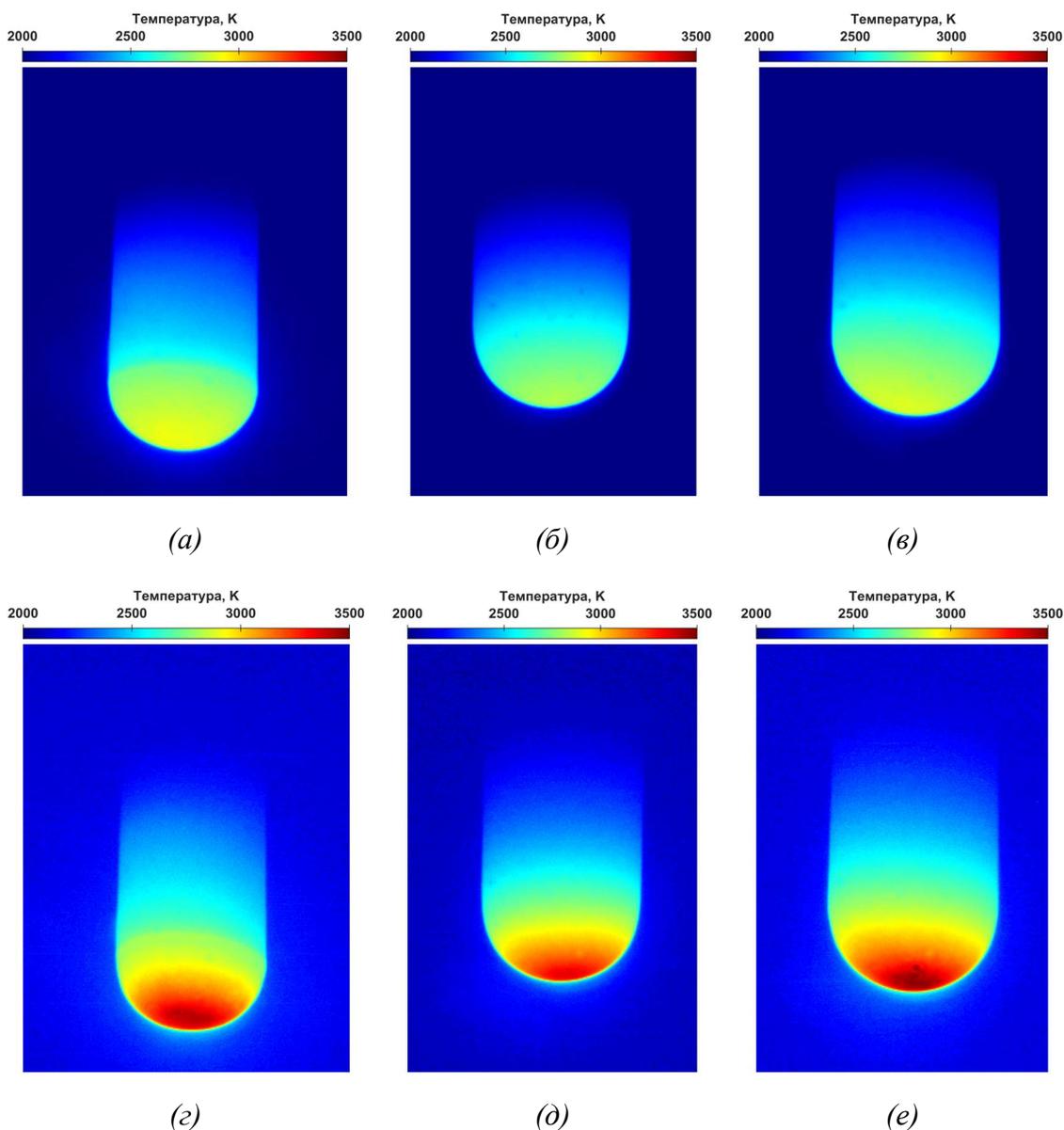


Рис. 7. Термоизображения образцов из графита МПГ-7 в потоке плазмы N_2 (а, з), CO_2 (б, д) и $25\%CO_2 + 75\%N_2$ (в, е), без лазерного нагрева (а, б, в) и с дополнительным лазерным нагревом поверхности (з, д, е)

Таблица 1

Результаты экспериментов с цилиндрическими образцами из графита МПГ-7 в струях плазмы установки ВГУ-4 разного состава при дополнительном лазерном нагреве поверхности и без него

№ Эксп.	Среда	q_{cw} , Вт/см ²	$I_{incident}$, Вт/см ²	T_{max} , К	m_0 , Г	Δm , Г	l_0 , мм	Δl , мм
24-212	100%N ₂	890	0	3060	23.1934	0.5153	50.2	0.4
24-214	100%N ₂	890	1440	3720	20.2158	0.5671	50.2	1.6
24-244	100%CO ₂	627	0	2710	24.8881	3.3319	50.0	2.1
24-245	100%CO ₂	627	1440	3200	24.9874	3.4354	50.0	2.3
24-246	75%N ₂ +25%CO ₂	740	0	2890	24.8466	1.1703	50.0	1.0
24-247	75%N ₂ +25%CO ₂	740	1440	3430	24.9510	1.2015	50.1	1.2

4. Поведение графита при лазерном нагреве в среде азота, нагреве в плазме азота и при комбинированном нагреве

Целью представленных § 4 экспериментов было изучить поведение образцов из графита в виде дисков диаметром 14 мм и толщиной 4 мм при нагреве до постоянной температуры разными способами:

- 1) лазерным излучением с обдувом поверхности струей холодного азота;
- 2) плазмой азота без дополнительного воздействия лазера;
- 3) комбинированным воздействием на поверхность плазмы азота и лазерного луча.

Образцы устанавливались в гнезде на лобовой части цилиндрической модели диаметром 30 мм, схема которой приведена в [28]. Струя плазмы или холодного газа натекала на поверхность образца из цилиндрического канала плазмотрона ВГУ-4 диаметром 80 мм, расход азота во всех случаях составлял $G = 2.4$ г/с. Расстояние от выходного сечения канала до поверхности образца составляло $z = 60$ мм. Эксперименты по лазерному нагреву проведены при давлении в испытательной камере $p_{ch} = 900$ Па, эксперименты по комбинированному и плазменному нагреву проведены при $p_{ch} = 1 \times 10^4$ Па. Продолжительность воздействия Δt составляла 300 или 600 с.

Способ подвода лазерного луча аналогичен экспериментам [24]. При выходной мощности лазера $P_{output} = 192$ Вт (источник IPG Photonics YLPN-1-100-200-R) с учетом потерь в оптическом тракте нагреваемой поверхности достигает $P_{incident} = 168$ Вт. Распределение облученности в пятне диаметром $d_{beam} = 7.1$ мм близко к гауссовскому с максимальной интенсивностью $I_{incident} = 850$ Вт/см². Меньший относительно диаметра образца диаметр лазерного пятна приводит к неоднородному распределению температуры поверхности по сравнению с плазменным нагревом (рис. 8), что затрудняет прямое сравнение экспериментальных данных для реализованных режимов.

Обобщенные результаты экспериментов представлены в Таблице 2. Зависимости от времени температуры T в центре лицевой поверхности образцов для соответствующих экспериментов показаны на рис. 9.

В экспериментах по лазерному нагреву образцов с обдувом холодным азотом (25-042 и 25-043) максимальная температура в центре лицевой поверхности достигла 1725 К (при подведенной мощности $P_{incident} = 168$ Вт). Зарегистрирован унос массы графита, связанный, вероятно, с явлением спалляции углерода, поскольку в процессе нагрева у поверхности наблюдались треки частиц (рис. 10).

В экспериментах без лазерного нагрева (25-047 и 25-048) температура поверхности 1700 К достигнута в плазме азота при мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию $N_{ap} = 31$ кВт. Большой унос массы обусловлен как тем, что в данном режиме до высокой температуры была нагрета вся поверхность образца, а не только центральная ее часть, так и появлением дополнительного химического механизма уноса за счет нитрирования углерода атомарным азотом.

Комбинированное воздействие плазмы азота при $N_{ap} = 31$ кВт и лазерного луча при $P_{incident} = 168$ Вт (эксперимент 25-049) позволило нагреть поверхность графита до 2180 К. Та же температура может быть достигнута в режиме нагрева струей N₂-плазмы без лазера при мощности ВЧ-генератора $N_{ap} = 72$ кВт (эксперимент 25-051). Рост массового уноса в эксперименте 25-051 связан с интенсификацией нитрирования за счет увеличения степени диссоциации азота при большей энтальпии потока, а также с большей площадью поверхности образца, нагретой до 2180 К в этом режиме.

Таблица 2

Результаты экспериментов с образцами МПГ-7 в виде дисков

№ Эксп.	Режим	p_{ch} , Па	N_{ap} , кВт	P_{output} , Вт	Δt , с	T_{max} , К	m_0 , г	Δm , г
25-042	Лазер в среде N_2	$0.9 \cdot 10^3$	0	192	300	1725	1.3436	0.0100
25-043	Лазер в среде N_2	$0.9 \cdot 10^3$	0	192	600	1725	1.3481	0.0224
25-047	N_2 -плазма	$1 \cdot 10^4$	31	0	300	1700	1.3626	0.0196
25-048	N_2 -плазма	$1 \cdot 10^4$	31	0	600	1700	1.3410	0.0435
25-049	N_2 -плазма + лазер	$1 \cdot 10^4$	31	192	300	2180	1.3567	0.0267
25-051	N_2 -плазма	$1 \cdot 10^4$	72	0	300	2180	1.3410	0.0416

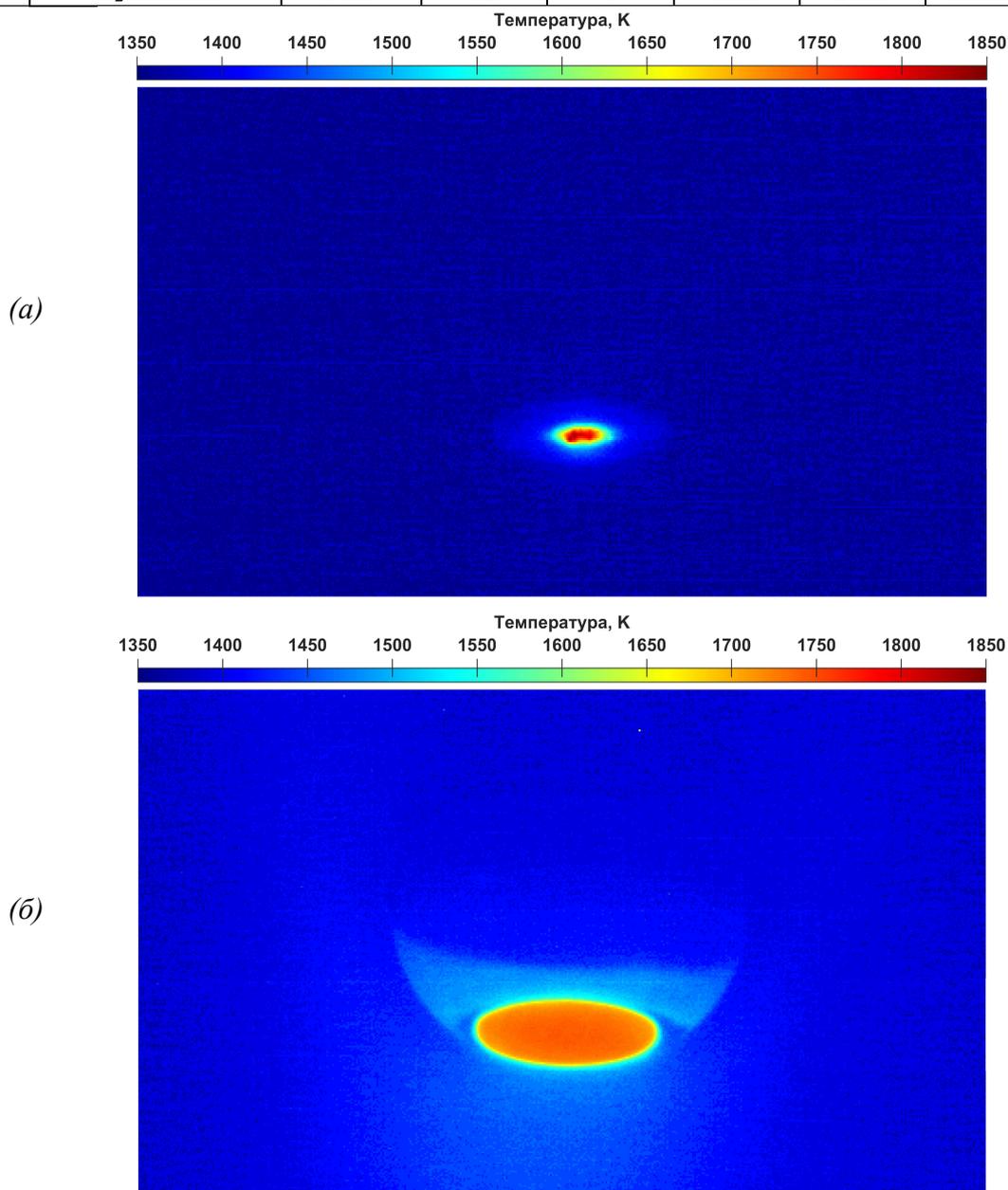


Рис. 8. Сравнение полей температур поверхности графитового образца в виде диска диаметром 14 мм при нагреве лазерным лучом (а) и дозвуковой струей плазмы азота (б)

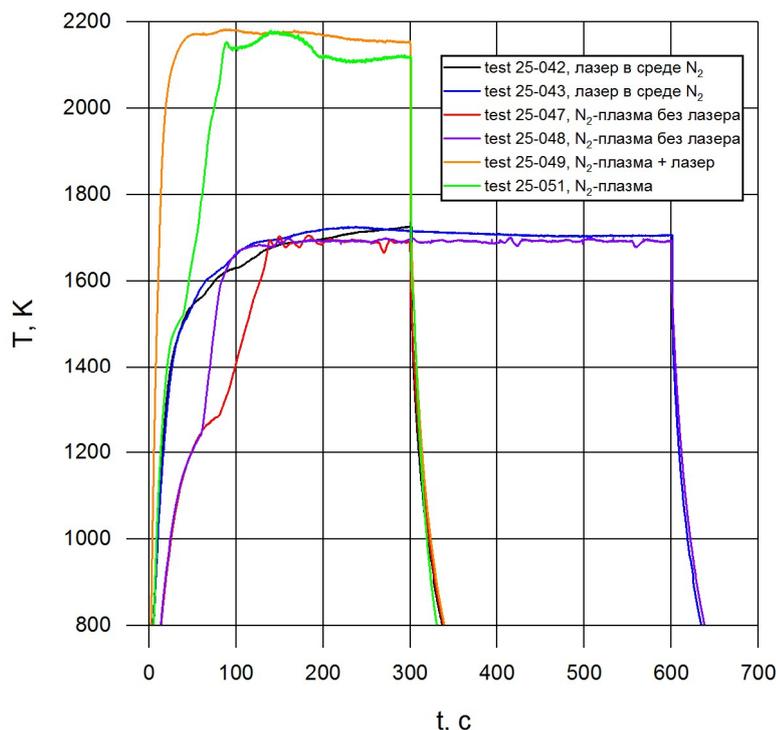


Рис. 9. Зависимости от времени температуры (T) в центре лицевой поверхности образцов из графита МПГ-7 в виде дисков, зарегистрированные яркостным пирометром при нагреве лазером в потоке холодного азота, при нагреве плазмой азота и при комбинированном нагреве



Рис. 10. Трек частицы углерода у поверхности образца графита МПГ-7, нагретого лазерным излучением

5. Заключение

Исследованы поведение и абляция образцов из графита МПГ-7 при нагреве в дозвуковых высокоэнтальпийных струях ВЧ-плазмотрона ВГУ-4, лазерном нагреве и при комбинированном воздействии на поверхность лазерного луча и диссоциированного газового потока. В различных режимах нагрева и средах реализованы температуры поверхности от 1700 до 3720 К. Продемонстрировано влияние химического состава набегающего потока на массовый унос материала. Максимальные массовый и линейный уносы материала наблюдались в CO_2 -плазме и связаны с окислением графита потоком. Увеличение температуры поверхности на 500 К за счет лазерного излучения в экспериментах в плазме CO_2 и смеси $75\% \text{N}_2 + 25\% \text{CO}_2$ не приводит к существенному росту потери массы материала, что характерно для диффузионного режима уноса углерода. При нагреве графита в N_2 -плазме с дополнительным воздействием лазерного луча температура лобовой поверхности цилиндрического образца достигла

3720 К и в этой области наблюдались признаки начала сублимации (образование кратера), однако потеря массы основной части образца происходила за счет нитрирования углерода атомарным азотом. Влияние окисления поверхности из-за подмеса воздуха в струю азотной плазмы было исключено, поскольку контролировался спектр излучения потока.

Эксперименты по лазерному нагреву графитовых образцов в виде дисков до 1700 К в потоке холодного азота показали возможность уноса материала из-за спалляции углерода. Вероятно, этот эффект вносил вклад в абляцию графита и в экспериментах с плазмой, но ее собственное излучение не позволяло наблюдать треки отдельных углеродных частиц. Недостатком использовавшейся схемы экспериментов является неоднородность пятна нагрева при воздействии лазера, что затрудняет анализ результатов. Эта методическая проблема может быть решена в дальнейших экспериментах за счет совершенствования схемы подвода лазерного излучения.

В представленных экспериментах наблюдались различные механизмы высокотемпературной абляции графита: химический унос за счет окисления и нитрирования поверхности, начало сублимации в области максимальных температур, спалляция углерода. На поведение образцов существенно влияли условия высокотемпературного воздействия. Таким образом, при стендовых испытаниях углеродных материалов тепловой защиты космических аппаратов, предназначенных для входа в атмосферы планет и спутников Солнечной системы (Венеры, Марса, Титана), требуется воспроизвести не только расчетную температуру поверхности, но и обеспечить соответствующий реальным условиям химический состав набегающего потока (в том числе концентрации компонент по толщине пограничного слоя) и достоверное соотношение лучистой и конвективной составляющих подводимого высокоинтенсивного теплового потока.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена по теме гранта РФ 22-79-10083 (<https://rscf.ru/project/22-79-10083/>) с использованием ВЧ-плазмотрона ВГУ-4, который входит в состав уникальной научной установки РФ «Высокочастотные индукционные плазмотроны ВГУ-3 и ВГУ-4» (<http://www.ckp-rf.ru//usu/441568>).

Литература

1. Poloni E., Bouville F., Schmid A.L., Pelissari P.I., Pandolfelli V.C., Sousa M.L., Tervoort E., Christidis G., Shklover V., Leuthold J., Studart A.R. Carbon ablators with porosity tailored for aerospace thermal protection during atmospheric re-entry // *Carbon*. 2022. Vol. 195. Pp. 80–91. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.03.062
2. Mangalgi P.D. Composite materials for aerospace applications // *Bull. Mater. Sci.* 1999. Vol. 22, № 3. Pp. 657–664. DOI: 10.1007/BF02749982
3. Pulci G., Tirillò J., Marra F., Fossati F., Bartuli C., Valente T. Carbon–phenolic ablative materials for re-entry space vehicles: Manufacturing and properties // *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 2010. Vol. 41, № 10. Pp. 1483–1490. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.06.010
4. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
5. Duffa G. Ablative Thermal Protection Systems Modeling. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013. DOI: 10.2514/4.101717
6. Park C. Effects of atomic oxygen on graphite ablation // *AIAA J.* 1976. Vol. 14, № 11. Pp. 1640–1642. DOI: 10.2514/3.7267
7. Walls J.R., Strickland-Constable R.F. Oxidation of carbon between 1000–2400°C // *Carbon*. 1964. Vol. 1, № 3. Pp. 333–338. DOI: 10.1016/0008-6223(64)90288-X
8. Metzger J.W., Engel M.J., Diaconis N.S. Oxidation and sublimation of graphite in simulated re-entry environments // *AIAA J.* 1967. Vol. 5, № 3. Pp. 451–460. DOI: 10.2514/3.4001

9. Goldstein H.W. The Reaction of Active Nitrogen with Graphite // *J. Phys. Chem. American Chemical Society*, 1964. Vol. 68, № 1. Pp. 39–42. DOI: 10.1021/j100783a007
10. Suzuki T., Fujita K., Ando K., Sakai T. Experimental Study of Graphite Ablation in Nitrogen Flow // *J. Thermophys. Heat Transf.* 2008. Vol. 22, № 3. Pp. 382–389. DOI: 10.2514/1.35082
11. Helber B., Turchi A., Magin T.E. Determination of active nitridation reaction efficiency of graphite in inductively coupled plasma flows // *Carbon*. 2017. Vol. 125. Pp. 582–594. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.09.081
12. Grigat F., Löhle S., Eberhart M., Meindl A., Poloni E., Ravichandran R., Zuber C., Fasoulas S. Spallation of Carbon Ablators in Arcjet Facility Experiments // *J. Thermophys. Heat Transf.* 2023. Vol. 37, № 2. Pp. 341–352. DOI: 10.2514/1.T6587
13. Martin A., Bailey S.C., Panerai F., Davuluri R.S., Zhang H., Vazsonyi A.R., Lippay Z.S., Mansour N.N., Inman J.A., Bathel B.F., Splinter S.C. Numerical and experimental analysis of spallation phenomena // *CEAS Space J.* 2016. Vol. 8, № 4. Pp. 229–236. DOI: 10.1007/s12567-016-0118-4
14. Гордеев А. Н., Залогин Г. Н., Колесников А. Ф. Экспериментальное исследование уноса массы углеродных материалов в потоке чистого диссоциированного азота // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2010. Т. 9, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/126/>
15. Kolesnikov A. F., Lukomskii I. V., Sakharov V. I., Chaplygin A. V. Experimental and Numerical Modeling of Heat Transfer to Graphite Surface in Underexpanded Dissociated-Nitrogen Jets // *Fluid Dyn.* 2021. Vol. 56, № 6. Pp. 897–905. DOI: 10.1134/S0015462821060070
16. Chaplygin A., Yakimov M., Vasil'evskii S., Kotov M., Lukomskii I., Galkin S., Shemyakin A., Solovyov N., Kolesnikov A. Combined Plasma and Laser Heating of Graphite // *Plasma*. 2025. 8(1), 9. DOI: 10.3390/plasma8010009
17. Gordeev A. Overview of characteristics and experiments in IPM plasmatrons // *VKI Spec. Course Meas. Tech. High Enthalpy Plasma Flows*. Rhode-Saint-Genese, 1999.
18. Chaplygin A., Kotov M., Yakimov M., Lukomskii I., Galkin S., Kolesnikov A., Shemyakin A., Solovyov N. Combined Surface Heating by Laser Beam and Subsonic Nitrogen Plasma Jet // *Fluids*. 2023. 8(1), 11. DOI: 10.3390/fluids8010011
19. Biasetto L., Manzolaro M., Andrighetto A. Emissivity measurements of opaque gray bodies up to 2000 °C by a dual-frequency pyrometer // *Eur. Phys. J. A*. 2008. Vol. 38, № 2. Pp. 167–171. DOI: 10.1140/epja/i2008-10666-6
20. Purpura C. Methods for the Material Spectral Emissivity Evaluation by Dual-Color Pyrometer in a Hypersonic Plasma Test Facility // *IEEE J. Miniaturization Air Space Syst.* 2021. Vol. 2, № 2. Pp. 92–97. DOI: 10.1109/JMASS.2020.3023968
21. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник. Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
22. Thorn R.J., Simpson O.C. Spectral Emissivities of Graphite and Carbon // *J. Appl. Phys.* 1953. Vol. 24, № 5. Pp. 633–639. DOI: 10.1063/1.1721341
23. Kramida A., Ralchenko Y. NIST Atomic Spectra Database, NIST Standard Reference Database 78. National Institute of Standards and Technology, 1999. DOI: 10.18434/T4W30F
24. Chaplygin A., Simonenko E., Simonenko N., Kotov M., Yakimov M., Lukomskii I., Galkin S., Kolesnikov A., Vasil'evskii S., Shemyakin A., Solovyov N. Heat transfer and behavior of ultra-high temperature ceramic materials under exposure to supersonic carbon dioxide plasma with additional laser irradiation // *Int. J. Therm. Sci.* 2024. Vol. 201. P. 109005. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109005
25. Kolesnikov A.F., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A., Yakushin M.I. Study of Quartz Surface Catalycity in Dissociated Carbon Dioxide Subsonic Flows // *J. Spacecr. Rockets*. 2000. Vol. 37, № 5. Pp. 573–579. DOI: 10.2514/2.3629

26. Patankar S.V., Spalding D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion. 1983. Pp. 54–73. DOI: 10.1016/B978-0-08-030937-8.50013-1
27. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow // Washington. 1980. 214 p. DOI: 10.1201/9781482234213
28. Simonenko E.P., Simonenko N.P., Gordeev A.N., Kolesnikov A.F., Chaplygin A.V., Lysenkov A.S., Nagornov I.A., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T. Oxidation of HfB₂-SiC-Ta₄HfC₅ ceramic material by a supersonic flow of dissociated air // J. Eur. Ceram. Soc. 2021. Vol. 41, № 2. Pp. 1088–1098. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.001

References

1. Poloni E., Bouville F., Schmid A. L., Pelissari P. I., Pandolfelli V. C., Sousa M. L., Tervoort E., Christidis G., Shklover V., Leuthold J., Studart A. R., Carbon ablators with porosity tailored for aerospace thermal protection during atmospheric re-entry, *Carbon*, 2022, vol. 195, pp. 80–91. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.03.062
2. Mangalgiri P. D., Composite materials for aerospace applications, *Bull. Mater. Sci.*, 1999, vol. 22, no. 3, pp. 657–664. DOI: 10.1007/BF02749982
3. Pulci G., Tirillò J., Marra F., Fossati F., Bartuli C., Valente T., Carbon–phenolic ablative materials for re-entry space vehicles: Manufacturing and properties, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 2010, vol. 41, no. 10, pp. 1483–1490. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.06.010
4. Polezhaev Yu. V., Yurevich F. B., *Thermal protection*, Moscow: Energia, 1976, 392 p. [in Russian].
5. Duffa G., Ablative Thermal Protection Systems Modeling, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2013. DOI: 10.2514/4.101717
6. Park C., Effects of atomic oxygen on graphite ablation, *AIAA J.*, 1976, vol. 14, no. 11. pp. 1640–1642. DOI: 10.2514/3.7267
7. Walls J. R., Strickland-Constable R.F., Oxidation of carbon between 1000–240°C, *Carbon*. 1964, vol. 1, no. 3. pp. 333–338. DOI: 10.1016/0008-6223(64)90288-X
8. Metzger J. W., Engel M. J., Diaconis N. S., Oxidation and sublimation of graphite in simulated re-entry environments, *AIAA J.*, 1967, vol. 5, no. 3, pp. 451–460. DOI: 10.2514/3.4001
9. Goldstein H.W. “The Reaction of Active Nitrogen with Graphite,” *J. Phys. Chem. American Chemical Society*, 1964. vol. 68, no. 1. pp. 39–42. DOI: 10.1021/j100783a007
10. Suzuki T., Fujita K., Ando K., Sakai T., Experimental Study of Graphite Ablation in Nitrogen Flow, *J. Thermophys. Heat Transf.*, 2008, vol. 22, no. 3. pp. 382–389. DOI: 10.2514/1.35082
11. Helber B., Turchi A., Magin T. E., Determination of active nitridation reaction efficiency of graphite in inductively coupled plasma flows, *Carbon*, 2017, vol. 125, pp. 582–594. DOI: 10.1016/j.carbon.2017.09.081
12. Grigat F., Löhle S., Eberhart M., Meindl A., Poloni E., Ravichandran R., Zuber C., Fasoulas S., Spallation of Carbon Ablators in Arcjet Facility Experiments, *J. Thermophys. Heat Transf.*, 2023, vol. 37, no. 2. pp. 341–352. DOI: 10.2514/1.T658
13. Martin A., Bailey S. C., Panerai F., Davuluri R. S., Zhang H., Vazsonyi A. R., Lippay Z. S., Mansour N. N., Inman J. A., Bathel B. F., Splinter S. C., Numerical and experimental analysis of spallation phenomena, *CEAS Space J.*, 2016, vol. 8, no. 4, pp. 229–236. DOI: 10.1007/s12567-016-0118-4
14. Gordeev A. N., Zalogin G. N., Kolesnikov A. F., Experimental study of carbon materials mass loss in dissociated flow of pure nitrogen, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2010, vol. 9, iss. 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2010-9/articles/126/>
15. Kolesnikov A. F., Lukomskii I. V., Sakharov V. I., Chaplygin A. V., Experimental and Numerical Modeling of Heat Transfer to Graphite Surface in Underexpanded Dissociated-Nitrogen Jets, *Fluid Dyn.*, 2021, vol. 56, no. 6, pp. 897–905. DOI: 10.1134/S0015462821060070

16. Chaplygin A., Yakimov M., Vasil'evskii S., Kotov M., Lukomskii I., Galkin S., Shemyakin A., Solovyov N., Kolesnikov A., Combined Plasma and Laser Heating of Graphite, *Plasma*, 2025, 8(1), 9. DOI: 10.3390/plasma8010009
17. Gordeev A., *Overview of characteristics and experiments in IPM plasmatrons // VKI Spec. Course Meas. Tech. High Enthalpy Plasma Flows*. Rhode-Saint-Genese, 1999.
18. Chaplygin A., Kotov M., Yakimov M., Lukomskii I., Galkin S., Kolesnikov A., Shemyakin A., Solovyov N., Combined Surface Heating by Laser Beam and Subsonic Nitrogen Plasma Jet, *Fluids*, 2023, 8(1), 11. DOI: 10.3390/fluids8010011
19. Biasetto L., Manzolaro M., Andrighetto A., Emissivity measurements of opaque gray bodies up to 2000°C by a dual-frequency pyrometer, *Eur. Phys. J. A.*, 2008, vol. 38, no. 2. pp. 167–171. DOI: 10.1140/epja/i2008-10666-6
20. Purpura C., Methods for the Material Spectral Emissivity Evaluation by Dual-Color Pyrometer in a Hypersonic Plasma Test Facility, *IEEE J. Miniaturization Air Space Syst.*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 92–97. DOI: 10.1109/JMASS.2020.3023968
21. *Radiation properties of solid materials. Handbook*, Edited by A.E. Sheindlin. Moscow: Energia, 1974. 472 p. [in Russian].
22. Thorn R. J., Simpson O. C., Spectral Emissivities of Graphite and Carbon, *J. Appl. Phys.*, 1953. vol. 24, no. 5. pp. 633–639. DOI: 10.1063/1.1721341
23. Kramida A., Ralchenko Y., *NIST Atomic Spectra Database*, NIST Standard Reference Database 78. National Institute of Standards and Technology, 1999. DOI: 10.18434/T4W30F
24. Chaplygin A., Simonenko E., Simonenko N., Kotov M., Yakimov M., Lukomskii I., Galkin S., Kolesnikov A., Vasil'evskii S., Shemyakin A., Solovyov N., Heat transfer and behavior of ultra-high temperature ceramic materials under exposure to supersonic carbon dioxide plasma with additional laser irradiation, *Int. J. Therm. Sci.*, 2024, vol. 201, P. 109005. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.109005
25. Kolesnikov A. F., Pershin I. S., Vasil'evskii S. A., Yakushin M. I., Study of Quartz Surface Catalycity in Dissociated Carbon Dioxide Subsonic Flows, *J. Spacecr. Rockets*, 2000, vol. 37, no. 5. pp. 573–579. DOI: 10.2514/2.3629
26. Patankar S. V., Spalding D. B., A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows, *Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion*, 1983, pp. 54–73. DOI: 10.1016/B978-0-08-030937-8.50013-1
27. Patankar S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, Washington. 1980. 214 p. DOI: 10.1201/9781482234213
28. Simonenko E. P., Simonenko N. P., Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., Chaplygin A. V., Lysenkov, A.S., Nagornov I. A., Sevastyanov V. G., Kuznetsov N. T., Oxidation of HfB₂-SiC-Ta₄HfC₅ ceramic material by a supersonic flow of dissociated air, *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2021, vol. 41, no. 2, pp. 1088–1098. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.001

Статья поступила в редакцию 22 апреля 2025 г.