

Experimental Study of the Effect of Overequilibrium Surface Heating in a Subsonic Jet of Dissociated Air

A. V. Chaplygin

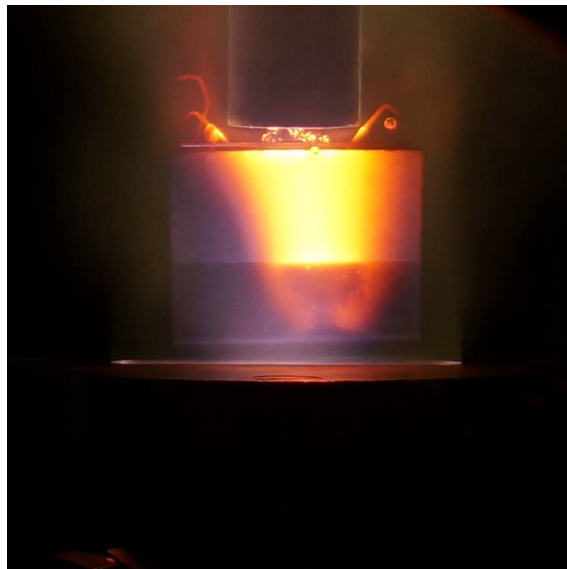
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russia*

alchapl87@gmail.com

Abstract

The effect of overequilibrium heating of a surface with nonuniform catalytic properties was experimentally studied in a subsonic flow of dissociated air in the IPG-4 RF-plasmatron. A temperature jump was observed on a plate made from the thermal protection material of the Buran orbital vehicle during the transition of the flow from the low-catalytic area of the surface to the high-catalytic area covered with the chromium-nickel spinel NiCr_2O_4 . A temperature jump was also observed on the heat-shielding tile of the Buran orbital vehicle during the transition of the flow from a low-catalytic area of its surface to a medium-catalytic area covered with niobium. The temperatures of surfaces with uniform and nonuniform catalytic properties under the same flow regimes were compared.

Keywords: overequilibrium heating, catalytic properties, RF-plasmatron, slit nozzle, dissociated air, heat transfer.



Temperature jump on the plate partially covered with chromium-nickel spinel NiCr_2O_4

УДК 533.6.011.8

Экспериментальное исследование эффекта сверхравновесного нагрева поверхности в дозвуковой струе диссоциированного воздуха

А. В. Чаплыгин

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

alchapl87@gmail.com

Аннотация

В ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 экспериментально исследован эффект сверхравновесного нагрева при обтекании поверхности с неоднородными каталитическими свойствами дозвуковым диссоциированным воздушным потоком. На пластине из материала тепловой защиты орбитального корабля «Буран» наблюдался скачок температуры при переходе от низкокatalитического участка поверхности к высококatalитическому участку, покрытому хромоникелевой шпинелью NiCr_2O_4 . На теплозащитной плитке орбитального корабля «Буран» также наблюдался скачок температуры при переходе от низкокatalитического участка поверхности к средnekatalитическому участку, покрытому ниобием. Проведено сравнение температур, реализуемых на поверхностях с однородными и неоднородными каталитическими свойствами при одинаковых режимах обтекания.

Ключевые слова: сверхравновесный нагрев, каталитичность, ВЧ-плазмотрон, щелевое сопло, диссоциированный воздух, теплообмен.

1. Введение

Эффект сверхравновесного нагрева можно наблюдать при обтекании диссоциированным химически неравновесным газовым потоком поверхности с неоднородными каталитическими свойствами. При переходе от некаталитического участка поверхности к каталитическому происходит скачок теплового потока и температуры до уровней, существенно превышающих значения, полученные на полностью каталитической поверхности или в случае равновесного пограничного слоя. Данный эффект обусловлен тем, что при одинаковых внешних условиях течения концентрации атомов диссоциированного газа в пограничном слое на некаталитической поверхности выше и их рекомбинация далее по потоку на каталитической поверхности приводит к ее дополнительному нагреву [1]. Сверхравновесный нагрев поверхности был реализован в полете аппарата «Бор-4», на котором устанавливались оснащенные термопарами теплозащитные плитки, в том числе несколько покрытых платиной. Температура на плитках с высококatalитическим платиновым покрытием, превышала соответствующее значение на штатных плитках на величину $\sim 400^\circ\text{C}$ [2]. В США проведена серия экспериментов с теплозащитными плитками многоцветного космического корабля «Space Shuttle» [3–6], где также наблюдался рост температуры на плитках с высококatalитическим покрытием. В лабораторных условиях эффект сверхравновесного нагрева изучался в индукционных плазмотронах ВГУ-2 и ВГУ-3 ИПМех РАН на образцах тепловой защиты орбитального корабля «Буран», частично покрытых высококatalитической хромоникелевой шпинелью [7]. В Исследовательском центре Эймса, в струях электродугового плазмотрона Aerodynamic Heating Facility (AHF), проведены эксперименты по нагреву образцов, на отдельные участки которых наносилось высококatalитическое покрытие [8],

разрабатываемое в рамках подготовки летного эксперимента Boundary Layer Transition (BLT) [9, 10]. На той же установке ранее осуществлялись испытания по программе Aeroassist Flight Experiments (AFE) – оценивался рост теплового потока на высококаталитических покрытиях различного состава по сравнению со штатным низкокatalитическим покрытием теплозащитных плиток орбитального корабля «Space Shuttle» [11]. В индукционном плазмотроне Института гидродинамики фон Кармана сверхравновесный нагрев был реализован на моделях со вставками из высококаталитического материала в ходе работ по созданию аппаратов EXPERT [12; 13] и IXV [14]. Вопросы математического моделирования течений при скачкообразном изменении каталитических свойств поверхности рассмотрены в работах [15–19].

Учитывая, что современные высокоскоростные летательные аппараты могут сочетать в своей конструкции высоко- и низкокatalитические участки поверхности, представляется актуальным дальнейшее экспериментальное исследование эффекта сверхравновесного нагрева в струях диссоциированных газов для различных комбинаций материалов. Цель настоящей работы – получение новых экспериментальных данных о режимах теплообмена пластин с неоднородными каталитическими свойствами поверхности в дозвуковом потоке диссоциированного воздуха.

2. Экспериментальная установка

Все эксперименты проводились в 100-киловаттном высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4, основные характеристики которого представлены в табл. 1. Подробное описание плазмотрона ВГУ-4 приведено в [20].

Таблица 1

Основные характеристики установки ВГУ-4

Мощность анодного питания, кВт	12 ÷ 72 (85*)
Частота, МГц	1.76
Диаметр разрядного канала, мм	80
Расход воздуха, г/с	2 ÷ 6
Режимы работы	Дозвуковой и сверхзвуковой
Давление в испытательной камере, гПа	6 ÷ 1000

*кратковременно

При исследованиях нагрева пластин и плиток, обтекаемых высокоэнтальпийными дозвуковыми струями воздуха под углами атаки, в установке ВГУ-4 использовалось щелевое водоохлаждаемое сопло с размерами выходного сечения 80×15 мм [21].

Измерение цветовой температуры поверхности образцов осуществлялось пирометрами спектрального отношения «Mikron M-770S» (рабочий диапазон 1000 ÷ 3000° С, показатель визирования 1:180) и «Термоконт-ТЦ5С8М» (рабочий диапазон 800 ÷ 3000° С, показатель визирования 1:200). Для серых тел, то есть тел, излучательная способность которых не зависит от длины волны, цветовая температура совпадает с истинной или достаточно близка к ней и не зависит от величины излучательной способности [22]. Поля температур на поверхности образцов регистрировались с помощью термовизора «Тандем VS-415U», прока-

либрованного по модели абсолютно чёрного тела в диапазоне температур $700 \div 2300^\circ \text{C}$. В показания термовизора вносились поправки на пропускание кварцевого оптического окна испытательной камеры (0.93) и излучательную способность нагреваемой поверхности на длине волны 0.9 мкм. Все указанные приборы были расположены бок о бок, в результате чего и угол визирования, и расстояние до объекта (1 м) у них были одинаковыми. Расход воздуха задавался протарированной по расходомеру-контроллеру расходомерной шайбой. Регистрация давления осуществлялась датчиком «Элемер АИР-20/М2-ДА» (установленный диапазон измерений $0 \div 1100$ гПа, погрешность 0.1 %). Регистрация мощности анодного питания осуществлялась с помощью сенсоров, входящих в состав ВЧ-генератора плазмотрона ВГУ-4.

3. Исследование нагрева образца с участками поверхности, покрытыми хромоникелевой шпинелью

В 1984 году на установке ВГУ-2 Института проблем механики АН СССР был проведен первый эксперимент по исследованию теплообмена поверхности с неоднородными каталитическими свойствами [7]. В эксперименте использовался образец из материала тепловой защиты орбитального корабля «Буран» ТЗМК-10 с черным низкокatalитическим покрытием [23–25], выполненный в форме пластины с размерами $45 \times 57 \times 10$ мм с цилиндрическим притуплением передней кромки. Часть поверхности образца была дополнительно покрыта высококatalитической хромоникелевой шпинелью NiCr_2O_4 . Образец вводился в дозвуковую струю воздушной плазмы таким образом, чтобы линия пересечения плоскостей симметрии образца лежала близко к оси струи. В выбранной конфигурации эксперимента в результате интенсивного локального теплового воздействия часть передней кромки была разрушена.

Щелевое сопло, устанавливаемое за разрядным каналом плазмотрона, позволило провести повторные эксперименты с аналогичным образцом в режиме, исключающем нежелательный перегрев передней кромки, а современные средства оптической пирометрии существенно повысили качество и объем полученных данных.

В проведенных экспериментах образец располагался за выходным сечением щелевого сопла с размерами выходного сечения 80×15 мм под углом атаки 0° , как это показано на рис. 1, зазор между передней кромкой и плоскостью выходного сечения сопла отсутствовал.

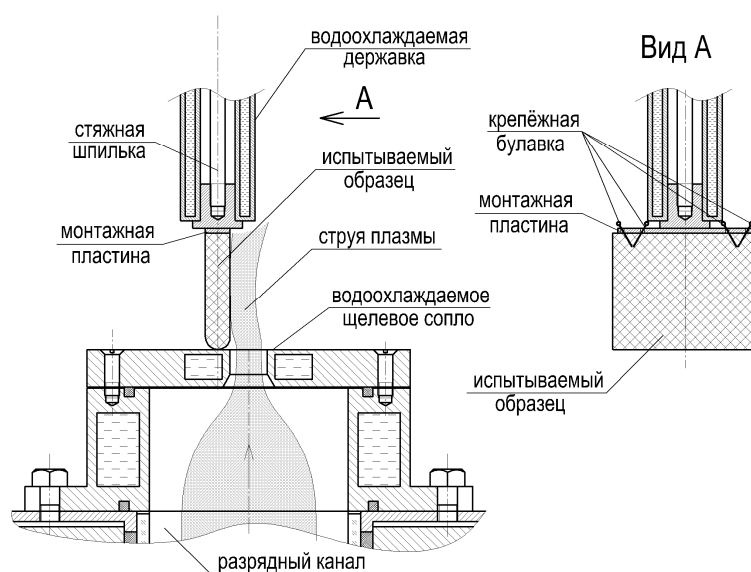


Рис. 1. Схема закрепления образца в форме пластины с цилиндрическим притуплением передней кромки

Фотографии образца до воздействия диссоциированного воздушного потока приведены на рис. 2. Сторона № 1 образца (рис. 2, *а*) была покрыта высококаталитической шпинелью только в верхней своей части (по всей ширине пластины, на участке длиной 25 мм). Сторона № 2 образца (рис. 2, *б*) была покрыта высококаталитической шпинелью по всей длине пластины, на участке шириной 30 мм.

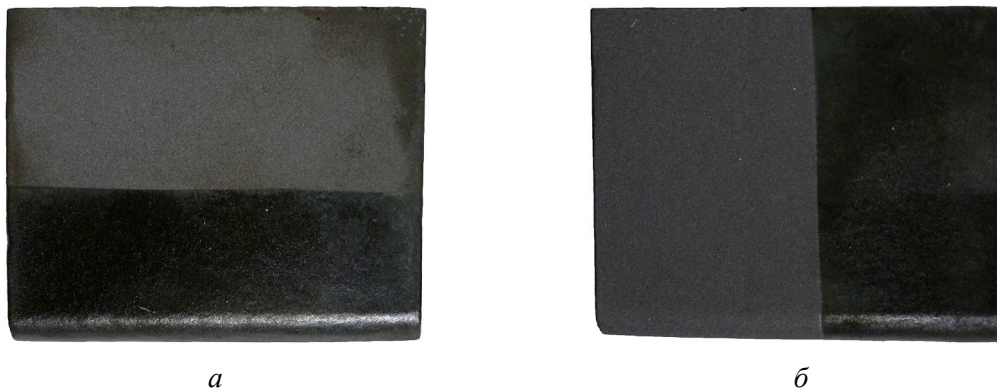


Рис. 2. Пластина из материала ТЗМК-10 с черным низкокatalитическим покрытием и участками, дополнительно покрытыми высококаталитической шпинелью NiCr_2O_4 , до воздействия диссоциированного воздушного потока

В двух отдельных экспериментах воздействию диссоциированного воздушного потока последовательно были подвергнуты обе стороны пластины (между экспериментами пластина была повернута в державке вокруг вертикальной оси на 180°), при этом режим работы установки (давление в барокамере, мощность ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию и расход воздуха), а также положение и настройки пирометров спектрального отношения и термовизора сохранялись неизменными. Эксперименты проведены при давлении в барокамере установки 100 гПа, расходе воздуха 2.4 г/с и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию 20 кВт.

Фотография стороны № 1 образца, нагреваемой дозвуковым диссоциированным воздушным потоком в установке ВГУ-4, представлена на рис. 3.

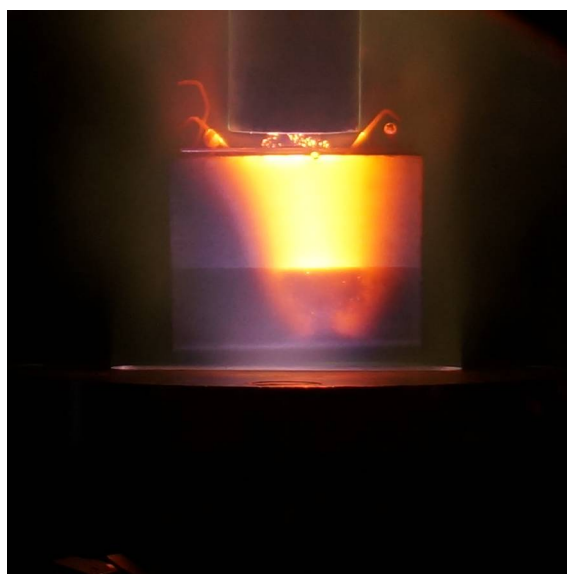


Рис. 3. Образец в струе воздушной плазмы

Фотографии образца после воздействия диссоциированного воздушного потока приведены на рис. 4, из которого видно, что участки поверхности пластины со штатным чер-

ным низкокatalитическим покрытием сохранили свой первоначальный вид, в то время как на участках, которые были дополнительно покрыты шпинелью NiCr_2O_4 , появились выраженные следы термхимического воздействия диссоциированного воздушного потока.

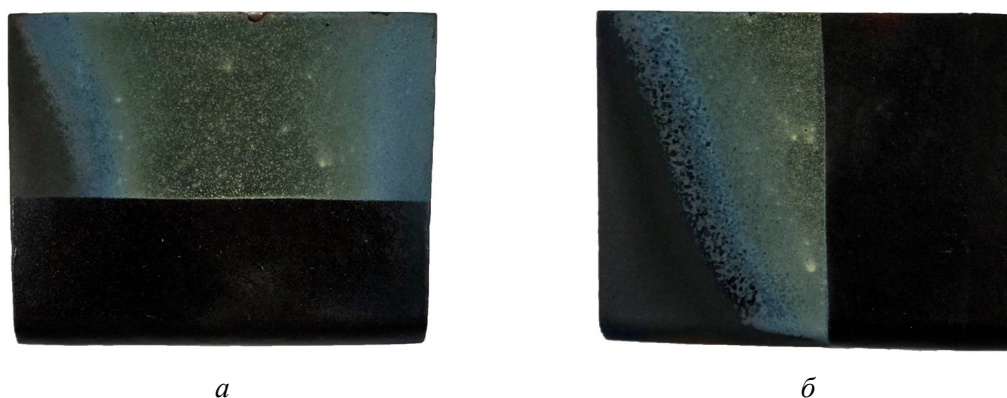


Рис. 4. Пластина из материала ТЗМК-10 с черным низкокatalитическим покрытием и участками, дополнительно покрытыми высококatalитической шпинелью NiCr_2O_4 , после воздействия диссоциированного воздушного потока

На рис. 5 приведены термоизображения образца, зарегистрированные с помощью термовизора «Тандем VS-415U» в процессе нагрева. Представленные термоизображения получены с учетом поправки на спектральную излучательную способность нагреваемой поверхности $\varepsilon_\lambda = 0.87$ (принятой на основе данных для черного низкокatalитического покрытия тепловой защиты орбитального корабля «Буран» [26]). Интегральная излучательная способность шпинели NiCr_2O_4 составляет не менее 0.87 в интервале температур $538 \div 1150^\circ\text{C}$ [27].

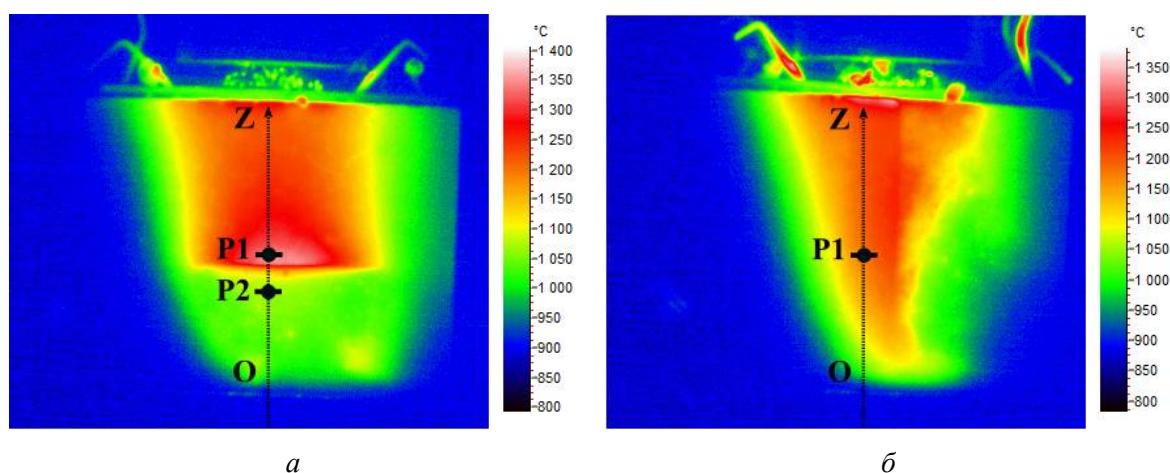


Рис. 5. Термоизображения стороны № 1 (а) и № 2 (б) пластины при нагреве в потоке диссоциированного воздуха: P1 – область визирования пирометра спектрального отношения «Mikron M-770S», P2 – область визирования пирометра спектрального отношения «Термоконт-ТЦ5С8М»

В предположении, что спектральная излучательная способность шпинели NiCr_2O_4 на длине волны 0.9 мкм близка к интегральной, а значит, и к спектральной излучательной способности черного низкокatalитического покрытия, дополнительные поправки для участков, покрытых шпинелью, не вводились (корректность этого допущения в процессе экспериментов была проверена сравнением показаний термовизора и пирометра спектрального отношения).

На рис. 5, а хорошо виден скачок температуры при переходе от низкокatalитического участка поверхности образца к высококatalитическому. Вертикальная граница между высоко- и низкокatalитическими участками поверхности на стороне № 2 пластины (рис. 5, б) размыта, но различима.

На рис. 6 показаны графики распределения температуры вдоль вертикальной линии сканирования (ось OZ на рис. 5) по данным термовизора «Тандем VS-415U», а также нанесены точки, соответствующие значениям цветовой температуры поверхности, измеренным в областях визирования P1 и P2 пирометрами спектрального отношения «Mikron M-770S» и «Термоконт-ТЦ5С8М».

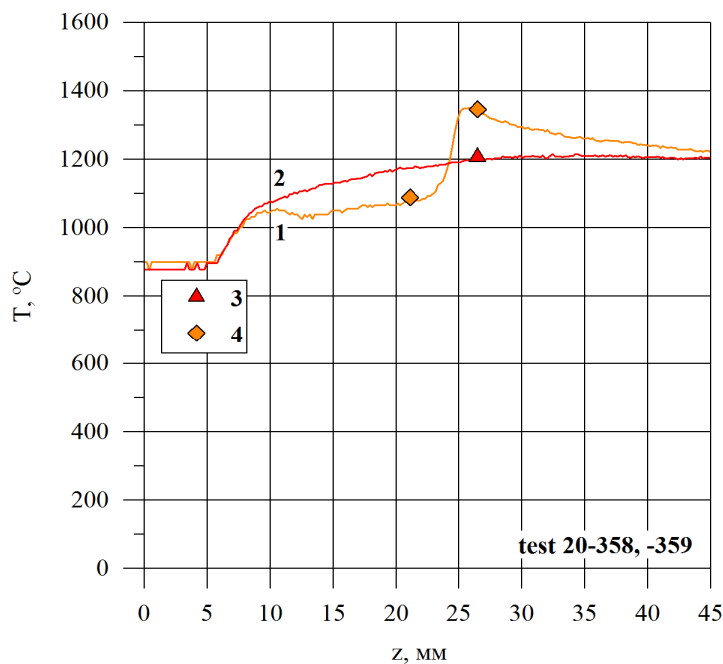


Рис. 6. Температура стороны № 1 (кривая 1, т. 4) и № 2 (кривая 2, т. 3) пластины по данным термовизора (кривые 1, 2) и пирометров спектрального отношения (т. 3, 4). z – координата, отсчитываемая от передней кромки пластины вдоль вертикальной линии сканирования OZ

Как видно из рис. 5, б, линия сканирования OZ для стороны № 2 пластины проходит по участку поверхности, полностью покрытому шпинелью NiCr_2O_4 , таким образом, кривая 2 и т. 3 на рис. 6 получены для случая обтекания высококatalитической поверхности. Кривая 1 и т. 4 соответствуют конфигурации эксперимента, в которой реализуется переход от низкокatalитического участка поверхности к высококatalитическому (см. рис. 5, а). Температура за линией перехода от низко- к высококatalитическому участку поверхности (сторона № 1) превышает температуру, измеренную на том же расстоянии от нижней кромки пластины для случая обтекания полностью высококatalитической поверхности, на величину $\sim 140^\circ\text{C}$, что объясняется эффектом сверхравновесного нагрева. Скачок температуры при переходе от низко- к высококatalитическому участку поверхности стороны № 1 по данным измерений пирометров спектрального отношения в областях P1 и P2 (см. рис. 5, а) составляет не менее 250°C . Наблюдается хорошее совпадение показаний термовизора и пирометров спектрального отношения, что подтверждает принятое допущение о близких значениях спектральной излучательной способности черного низкокatalитического покрытия и покрытия на основе хромоникелевой шпинели на рабочей длине волны термовизора 0.9 мкм.

4. Исследование нагрева образца с участком поверхности, покрытым ниобием

Представляет интерес наблюдение эффекта сверхравновесного нагрева для новых сочетаний материалов. В качестве материала, исследование которого в диссоциированном воздушном потоке может иметь практическое значение, был выбран ниобий (Nb). Ниобий и сплавы на его основе обладают высокой жаропрочностью и находят применение в авиационно-космической технике [28]. В [29] показано, что ниобий можно отнести к среднекаталитическим материалам по отношению к реакциям рекомбинации в потоке диссоциированного воздуха, причем эффективный коэффициент рекомбинации γ_w для ниобия (Nb) выше, чем у золота (Au), тантала (Ta), бериллия (Be) и молибдена (Mo). При переходе диссоциированного воздушного потока с низкокatalитической поверхности на поверхность, покрытую ниобием, можно ожидать проявления эффекта сверхравновесного нагрева.

В последующих экспериментах использовалась теплозащитная плитка орбитального корабля «Буран» с размерами $150 \times 150 \times 50$ мм. Плитка устанавливалась за выходным сечением щелевого сопла 80×15 мм под углом атаки 5° , как это показано на рис. 7. Все эксперименты проведены при давлении в барокамере установки 50 гПа, расходе воздуха 2.4 г/с и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию 25 кВт.

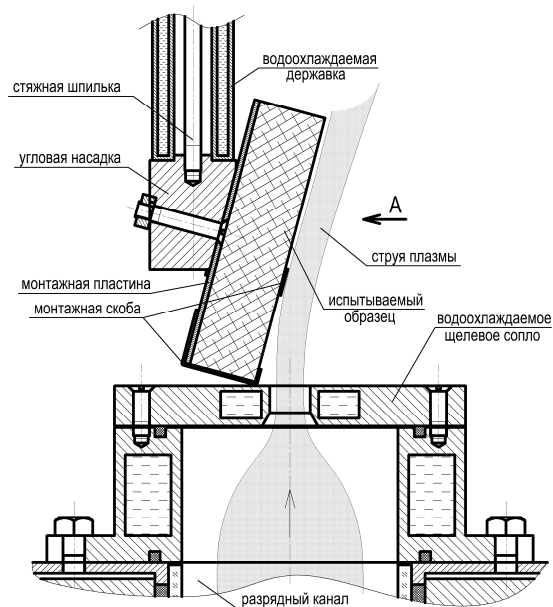


Рис. 7. Схема закрепления теплозащитной плитки

В первом из серии экспериментов в дозвуковой струе диссоциированного воздуха была нагрета теплозащитная плитка со штатным черным низкокatalитическим покрытием (т.е. получены температуры для случая обтекания полностью низкокatalитической поверхности). Далее методом магнетронного распыления на поверхность плитки была нанесена полоса из ниобия шириной 15 мм (рис. 8).

Последовательно проведены эксперименты, в которых полоса ниобия была ориентирована вдоль и поперек набегающего потока (при одинаковых параметрах работы установки).

Термоизображения, зарегистрированные для трех указанных случаев, приведены на рис. 9. Представленные термоизображения получены с учетом поправки на спектральную излучательную способность нагреваемой поверхности $\varepsilon_\lambda = 0.87$ (на длине волны 0.9 мкм). Указанное значение спектральной излучательной способности аналогично п. 3 взято по данным для черного низкокatalитического покрытия тепловой защиты орбитального корабля «Буран». Для окисленного ниобия в [30] приводятся значения спектральной излуча-

тельной способности 0.835 и 0.900 (при температуре 877° С, на длинах волн 1.15 и 0.6 мкм соответственно).

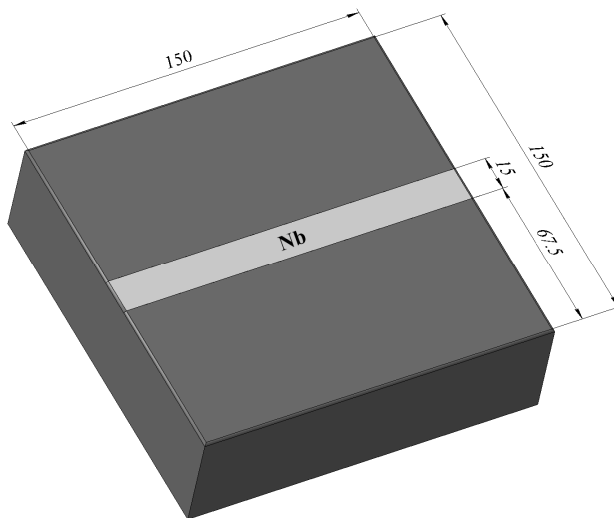


Рис. 8. Схема нанесения на поверхность теплозащитной плитки ниобиевого покрытия

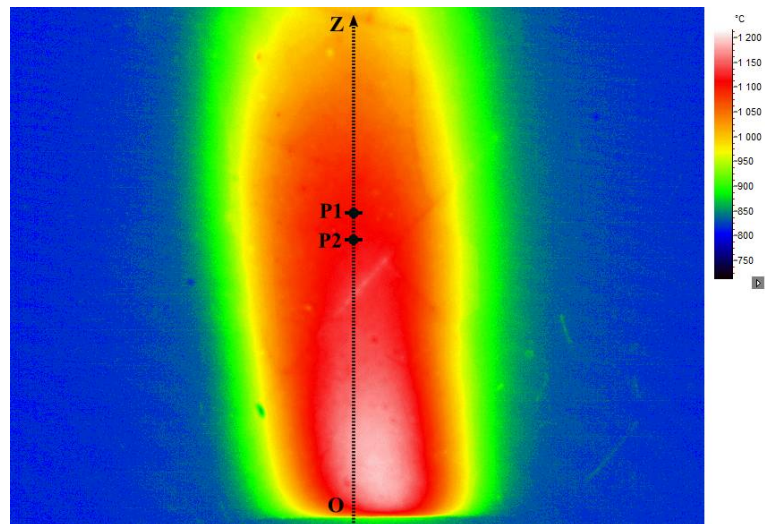
На рис. 9: P1 – область визирования пирометра спектрального отношения «Mikron M-770S», P2 – область визирования пирометра спектрального отношения «Термоконт-ТЦ5С8М». На рис. 9, б и 9, в хорошо различима полоса среднекаталитического покрытия из ниобия, температура на которой выше, чем на низкокatalитической части поверхности. Отклонение пятна нагрева от вертикальной оси OZ обусловлено остаточной закруткой потока на выходе из щелевого сопла (из-за особенностей организации течения в разрядном канале плазматрона ВГУ-4).

На рис. 10 показаны графики распределения температуры вдоль вертикальной линии сканирования (ось OZ на рис. 9) по данным термовизора «Тандем VS-415U», а также нанесены точки, соответствующие значениям цветовой температуры поверхности, измеренным в областях визирования P1 и P2 пирометрами спектрального отношения «Mikron M-770S» и «Термоконт-ТЦ5С8М».

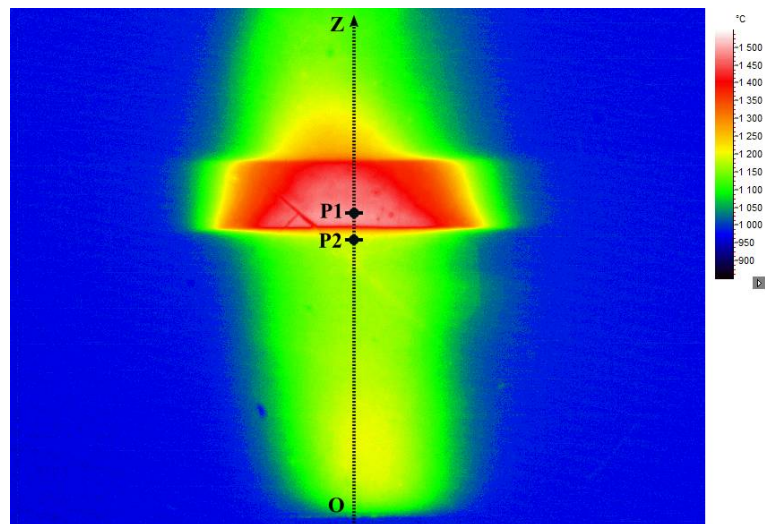
Как видно из рис. 9, в, линия сканирования OZ при вертикальной ориентации полосы Nb проходит по последней и не затрагивает низкокatalитические участки поверхности. Таким образом, кривая 3 и т. 6 соответствуют случаю обтекания диссоциированным потоком полностью среднекаталитической поверхности. Кривая 2 и т. 5 соответствуют конфигурации эксперимента, в которой реализуется переход от низкокatalитического участка поверхности к среднекаталитическому (рис. 9, б).

Температура за линией перехода от низко- к среднекаталитическому участку поверхности превышает температуру, измеренную на том же расстоянии от нижней кромки плитки для случая обтекания полностью среднекаталитической поверхности, на величину ~120° С (реализуется сверхравновесный нагрев). Скачок температуры при переходе от низко- к среднекаталитическому участку поверхности по данным измерений пирометров спектрального отношения в областях P1 и P2 (рис. 9, б) составляет 340° С.

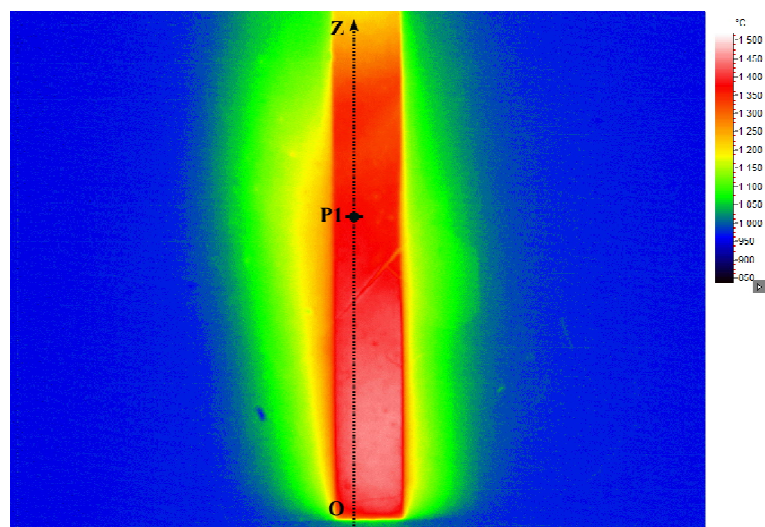
Данные термовизора и пирометров спектрального отношения хорошо согласуются между собой, что подтверждает корректность вводимой для показаний термовизора поправки на спектральную излучательную способность нагреваемой поверхности $\varepsilon_\lambda = 0.87$.



a



б



в

Рис. 9. Термоизображения, полученные при обтекании диссоциированным воздухом полностью низкокatalитической поверхности теплозащитной плитки (*a*), поверхности с горизонтальной полосой Nb (*б*) и поверхности с вертикальной полосой Nb (*в*)

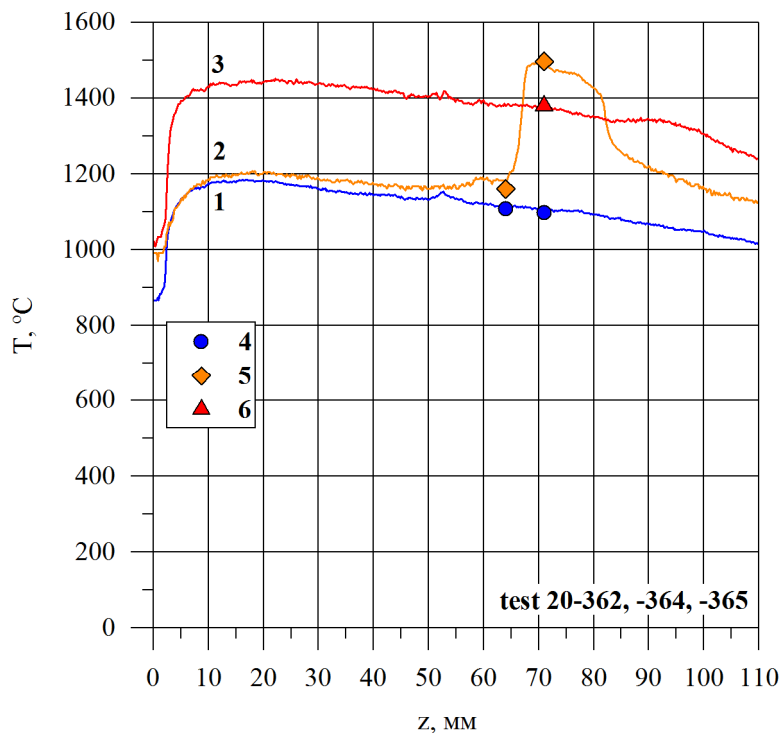


Рис. 10. Температура поверхности теплозащитной плитки со штатным черным низкокatalитическим покрытием (кривая 1, т. 4), с горизонтальной полосой Nb (кривая 2, т. 5), с вертикальной полосой Nb (кривая 3, т. 6). z – координата, отсчитываемая от передней кромки плитки вдоль вертикальной линии сканирования OZ

6. Заключение

В дозвуковых струях диссоциированного воздуха ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 проведены эксперименты, позволившие наблюдать эффект сверхравновесного нагрева при переходе от низкокatalитического участка поверхности пластины к высококatalитическому участку, покрытому хромоникелевой шпинелью (NiCr_2O_4). Температура за линией перехода от низко- к высококatalитическому участку поверхности превышала температуру, измеренную в той же области при обтекании полностью высококatalитической поверхностью, на величину $\sim 140^\circ\text{C}$.

На поверхности теплозащитной плитки орбитального корабля «Буран» впервые наблюдался эффект сверхравновесного нагрева при переходе от области со штатным черным низкокatalитическим покрытием к средnekatalитическому участку, покрытому ниобием (Nb). Температура за линией перехода от низко- к средnekatalитическому участку поверхности превышала температуру, измеренную в той же области для случая обтекания полностью средnekatalитической поверхностью, на величину $\sim 120^\circ\text{C}$.

Полученные результаты могут представлять интерес при исследовании теплообмена высокоскоростных летательных аппаратов с неоднородными кatalитическими свойствами обтекаемых поверхностей.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнена в рамках государственного задания АААА-А20-120011690135-5 на уникальной научной установке (УНУ) «Высокочастотные индукционные плазмотроны ВГУ-3 и ВГУ-4» (<https://ckp-rf.ru/usu/441568/>).

Автор благодарит И. В. Лукомского за помощь в подготовке образцов материалов и А. Ф. Колесникова за ценные обсуждения результатов.

Литература

1. Chung P. M., Liu S. W., Mirels H. Effect of discontinuity of surface catalycity on boundary layer flow of dissociated gas //International Journal of Heat and Mass Transfer. 1963. V. 6. № 3. Pp. 193–210. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(63\)90106-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(63)90106-6)
2. Воинов Л. П., Залогин Г. Н., Лунев В. В., Тимошенко В. П. Сравнительный анализ лабораторных и натурных данных о каталитичности материалов теплозащиты ЛА «Бор» и «Буран» //Космонавтика и ракетостроение. 1994. № 2. С. 51–57.
3. Rakich J., Stewart D., Lanfranco M. Results of a flight experiment on the catalytic efficiency of the Space Shuttle heat shield //3rd Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference. 1982. P. 944. <https://doi.org/10.2514/6.1982-944>
4. Scott C., Derry S. Catalytic recombination and the Space Shuttle heating //3rd Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference. 1982. P. 841. <https://doi.org/10.2514/6.1982-841>
5. Scott C. D. Effects of nonequilibrium and wall catalysis on Shuttle heat transfer //Journal of Spacecraft and Rockets. 1985. V. 22. № 5. Pp. 489–499. <https://doi.org/10.2514/3.25059>
6. Stewart D., Rakich J., Lanfranco M. Catalytic surface effects experiment on the Space Shuttle //16th Thermophysics Conference. 1982. P. 1143. <https://doi.org/10.2514/6.1981-1143>
7. Baronets P. N., Kolesnikov A. F., Kubarev S. N., Pershin I. S., Trukhanov A. S., Yakushin M. I. Overequilibrium heating of the surface of a heat-shield tile in a subsonic jet of dissociated air //Fluid Dynamics. 1991. V. 26. № 3. Pp. 437–442.
8. Stewart D., Gokcen T., Sepka S., Leiser D., Rezin M. Development of a catalytic coating for a Shuttle flight experiment //10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. 2010. P. 4321. <https://doi.org/10.2514/6.2010-4321>
9. Anderson B., Campbell C., Saucedo L., Kinder G., Berger K. Boundary Layer Transition Flight Experiment Overview and In Situ Measurements //48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010. P. 240. <https://doi.org/10.2514/6.2010-240>
10. Berger K., Anderson B., Campbell C., Garske M., Saucedo L., Kinder G., Micklos A. Boundary Layer Transition Flight Experiment Overview //42nd AIAA Thermophysics Conference. 2011. P. 3323. <https://doi.org/10.2514/6.2011-3323>
11. Stewart D., Kolodziej P. Wall catalysis experiment on AFE //23rd Thermophysics, Plasmadynamics and Lasers Conference. 1988. P. 2674. <https://doi.org/10.2514/6.1988-2674>
12. Chazot O., Panerai F., Muylaert J. M., Thoemel J. Catalysis phenomena determination in plasmatron facility for flight experiment design //48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010. P. 1248. <https://doi.org/10.2514/6.2010-1248>
13. Panerai F., Olivier C., Tagliaferri E., Rossi G. Testing of the EXPERT thermal protection system junction in a plasma wind tunnel //16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 2009. P. 7243. <https://doi.org/10.2514/6.2009-7243>
14. Viladegut A., Panerai F., Chazot O., Pichon T., Bertrand P., Verdy C., Coddet C. Design, integration and preliminary results of the IXV Catalysis experiment //CEAS Space Journal. 2017. V. 9. № 2. Pp. 141–151. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12567-016-0136-2>
15. Bepalov V. L., Voronkin V. G. Theory of a catalytic calorimeter //Fluid Dynamics. 1980. V. 15. № 1. Pp. 162–165.
16. Bogolepov V. V., Lipatov I. I., Sokolov L. A. Structure of chemically nonequilibrium flows with a sudden change in the temperature and the catalytic properties of the surface //Journal of applied mechanics and technical physics. 1990. V. 31. № 3. Pp. 367–377.
17. Гершбейн Э. А., Казаков В. Ю., Тирский Г. А. О развитии ламинарного пограничного слоя за точкой разрыва каталитической активности поверхности //Теплофизика высоких температур. – 1986. Т. 24. № 6. С. 1132–1142.

18. Гершбейн Э. А., Казаков В. Ю., Щелин В. С. О гиперзвуковом вязком ударном слое на поверхности со скачкообразным изменением каталитической активности //Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23. № 5. С. 916–921.
19. Inger G., Gnoffo P. Hypersonic entry heating with discontinuous surface catalycity-A combined analytic/CFD approach //Theoretical Fluid Mechanics Conference. 1996. P. 2150.
20. 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.
21. 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. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/780/>
22. Фрунзе А. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения //Фотоника. 2009. № 4. С. 32–37.
23. Баронец П. Н., Гордеев А. Н., Колесников А. Ф., Мысова В. М., Першин И. С., Прилепский В. Н., Рулев Ю. К., Труханов А. С., Якушин М. И. Отработка теплозащитных материалов орбитального корабля «Буран» на индукционных плазмотронах //Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. 1990. Т. 1991. С. 41–52.
24. Щетанов Б. В. Материал плитки для внешнего высокотемпературного теплозащитного покрытия орбитального корабля «Буран» //Авиационные материалы и технологии. 2013. № S1.
25. Солнцев С. С. Эрозионностойкие влагозащитные терморегулирующие покрытия многогранной теплозащиты орбитального корабля «Буран» //Авиационные материалы и технологии. 2013. № S1.
26. Дождиков В. С., Петров В.А. Излучательные характеристики теплозащитных материалов орбитального корабля «Буран» // Инж.-физ.ж. 2000. Т. 73. № 1. С. 26–30.
27. Баринаова О. П., Васильков О. О., Просвириков В. М., Токарь С. В. Исследование спектральных характеристик терморегулирующих покрытий на основе хромоникелевой шпинели NiCr_2O_4 //Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т. 30. № 7 (176). С. 19–20.
28. Prasad V. V. S., Baligheid R. G., Gokhale A. A. Niobium and Other High Temperature Refractory Metals for Aerospace Applications //Aerospace Materials and Material Technologies. Springer, Singapore, 2017. Pp. 267–288. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_12
29. Васильевский С. А., Гордеев А. Н., Колесников А. Ф., Чаплыгин А. В. Тепловой эффект поверхностного катализа в дозвуковых струях диссоциированного воздуха: эксперимент на ВЧ-плазмотроне и численное моделирование //Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2020. № 5. С. 137–150.
30. Touloukian Y. S. Thermal radiative properties – Metallic elements and alloys //Thermophysical Properties of Matter – The TPRC Data Series. 1970. V. 7. Pp. 486–490.

References

1. Chung, P. M., Liu, S. W., Mirels, H., “Effect of discontinuity of surface catalycity on boundary layer flow of dissociated gas,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 6, No. 3, 1963, Pp. 193–210. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(63\)90106-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(63)90106-6)
2. Voinov, L. P., Zalogin, G. N., Lunev, V. V., Timoshenko, V. P., “Sravnitel'nyj analiz laboratornyh i naturnyh dannyh o katalitichnosti materialov teplozashhity LA «Bor» i «Buran»,” *Kosmonavtika i raketostroenie*, No. 2, 1994, pp. 51–57.
3. Rakich, J., Stewart, D., Lanfranco, M. Results of a flight experiment on the catalytic efficiency of the Space Shuttle heat shield,” *3rd Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference*, AIAA Paper, 1982, p. 944. <https://doi.org/10.2514/6.1982-944>

4. Scott, C., Derry, S., "Catalytic recombination and the Space Shuttle heating," *3rd Joint Thermophysics, Fluids, Plasma and Heat Transfer Conference*, AIAA Paper, 1982, p. 841. <https://doi.org/10.2514/6.1982-841>
5. Scott, C. D., "Effects of nonequilibrium and wall catalysis on Shuttle heat transfer," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 22, No. 5, 1985, pp. 489–499. <https://doi.org/10.2514/3.25059>
6. Stewart, D., Rakich, J., Lanfranco, M., "Catalytic surface effects experiment on the Space Shuttle," *16th Thermophysics Conference*, AIAA Paper, 1982, p. 1143. <https://doi.org/10.2514/6.1981-1143>
7. Baronets, P. N., Kolesnikov, A. F., Kubarev, S. N., Pershin, I. S., Trukhanov, A. S., Yakushin, M. I., "Overequilibrium heating of the surface of a heat-shield tile in a subsonic jet of dissociated air," *Fluid Dynamics*, Vol. 26, No. 3, 1991, pp. 437–442.
8. Stewart, D., Gokcen, T., Sepka, S., Leiser, D., Rezin, M., "Development of a catalytic coating for a Shuttle flight experiment," *10th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, AIAA Paper, 2010, p. 4321. <https://doi.org/10.2514/6.2010-4321>
9. Anderson, B., Campbell, C., Saucedo, L., Kinder, G., Berger, K., "Boundary Layer Transition Flight Experiment Overview and In Situ Measurements," *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2010, p. 240. <https://doi.org/10.2514/6.2010-240>
10. Berger, K., Anderson, B., Campbell, C., Garske, M., Saucedo, L., Kinder, G., Micklos, A., "Boundary Layer Transition Flight Experiment Overview," *42nd AIAA Thermophysics Conference*, AIAA Paper, 2011, p. 3323. <https://doi.org/10.2514/6.2011-3323>
11. Stewart, D., Kolodziej, P., "Wall catalysis experiment on AFE," *23rd Thermophysics, Plasmadynamics and Lasers Conference*, AIAA Paper, 1988, p. 2674. <https://doi.org/10.2514/6.1988-2674>
12. Chazot, O., Panerai, F., Muylaert, J. M., Thoemel, J., "Catalysis phenomena determination in plasmatron facility for flight experiment design," *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, AIAA Paper, 2010, p. 1248. <https://doi.org/10.2514/6.2010-1248>
13. Panerai, F., Olivier, C., Tagliaferri, E., Rossi, G., "Testing of the EXPERT thermal protection system junction in a plasma wind tunnel," *16th AIAA/DLR/DGLR International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference*, AIAA Paper, 2009, p. 7243. <https://doi.org/10.2514/6.2009-7243>
14. Viladegut, A., Panerai, F., Chazot, O., Pichon, T., Bertrand, P., Verdy, C., Coddet, C., "Design, integration and preliminary results of the IXV Catalysis experiment," *CEAS Space Journal*, Vol. 9, No. 2, 2017, pp. 141–151. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12567-016-0136-2>
15. Bepalov, V. L., Voronkin, V. G., "Theory of a catalytic calorimeter," *Fluid Dynamics*, Vol. 15, No. 1, 1980, pp. 162–165.
16. Bogolepov, V. V., Lipatov, I. I., Sokolov, L. A., "Structure of chemically nonequilibrium flows with a sudden change in the temperature and the catalytic properties of the surface," *Journal of applied mechanics and technical physics*, Vol. 31, No. 3, 1990, pp. 367–377.
17. Gershbejn, Je. A., Kazakov, V. Ju., Tirskij, G. A., "O razvitii laminarnogo pograničnogo sloja za tochkoy razryva katalitičeskoj aktivnosti poverhnosti," *Teplofizika vysokih temperature*, Vol. 24, No. 6, 1986, pp. 1132–1142.
18. Gershbejn, Je. A., Kazakov, V. Ju., Shhelin, B. C., "O giperzvukovom vjazkom udarnom sloe na poverhnosti so skachkoobraznym izmenenijem katalitičeskoj aktivnosti," *Teplofizika vysokih temperature*, Vol. 23, No. 5, 1985, pp. 916–921.
19. Inger, G., Gnoffo, P., "Hypersonic entry heating with discontinuous surface catalycity-A combined analytic/CFD approach," *Theoretical Fluid Mechanics Conference*, AIAA Paper, 1996, p. 2150.
20. Gordeev, A. N., Kolesnikov, A. F., "Vysokochastotnye indukcionnye plazmotrony serii VGU," *Sb. Aktual'nye problemy mehaniki: Fiziko-himicheskaja mehanika zhidkostej i gazov*, Moskva, Nauka, 2010, pp. 151–177.

21. Gordeev, A. N., Chaplygin, A. V., “Experimental study of heat transfer between dissociated air flow and a flat plate at angle of attack in RF-plasmatron,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 20, No. 1. 2019. <http://chemphys.edu.ru/issues/2019-20-1/articles/780/>
22. Frunze, A., “Pirometry spektral'nogo otnoshenija: preimushhestva, nedostatki i puti ih ustraneniya,” *Fotonika*, No. 4, 2009, pp. 32–37.
23. Baronec, P. N., Gordeev, A. N., Kolesnikov, A. F., Mysova, V. M., Pershin, I. S., Prilepskiy, V. N., Rulev, Ju. K., Truhanov, A. S., Jakushin, M. I., “Otrabotka teplozashhitnyh materialov orbital'nogo korablja «Buran» na indukcionnyh plazmotronah,” *Gagarinskie nauchnye chtenija po kosmonavtike i aviacii*, 1990. Vol. 1991, pp. 41–52.
24. Shhetanov, B. V., “Material plitki dlja vneshnego vysokotemperaturnogo teplozashhitnogo pokrytija orbital'nogo korablja «Buran»,” *Aviacionnye materialy i tehnologii*, No. S1, 2013.
25. Solncev, S. S., “Jerozionnostojkie vlagozashhitnye termoregulirujushhie pokrytija mnogorazovoj teplozashhity orbital'nogo korablja «Buran»,” *Aviacionnye materialy i tehnologii*, No. S1, 2013.
26. Dozhdikov, V. S., Petrov, V. A., “Izluchatel'nye harakteristiki teplozashhitnyh materialov orbital'nogo korablja «Buran»,” *Inzh.-fiz. zh.*, Vol. 73, No. 1, 2000, pp. 26–30.
27. Barinova, O. P., Vasil'kov, O. O., Prosvirikov, V. M., Tokar', S.V., “Issledovanie spektral'nyh harakteristik termoregulirujushhih pokrytij na osnove hromonikelevoj shpineli NiCr_2O_4 ,” *Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii*, Vol. 30, No. 7 (176), 2016, pp. 19–20.
28. Prasad, V. V. S., Baligidad, R. G., Gokhale, A. A., “Niobium and Other High Temperature Refractory Metals for Aerospace Applications,” *Aerospace Materials and Material Technologies*, Springer, Singapore, 2017, pp. 267–288. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_12
29. Vasil'evskij, S. A., Gordeev, A. N., Kolesnikov, A. F., Chaplygin, A. V., “Teplovoj jeffekt poverhnostnogo kataliza v dozvukovyh strujah dissociirovannogo vozduha: jeksperiment na VCh-plazmotrone i chislennoe modelirovanie,” *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika zhidkosti i gaza*, No. 5, 2020, pp. 137–150.
30. Touloukian, Y. S., “Thermal radiative properties – Metallic elements and alloys,” *Thermophysical Properties of Matter - The TPRC Data Series*, Vol. 7, 1970, pp. 486–490.

Статья поступила в редакцию 18 января 2021 г.