

**Методика решения обратных задач
математической физики по определению эффективных
физических свойств углеродных материалов
абляционной тепловой защиты**

© В.В. Горский^{1,3}, А.Н. Гордеев², А.А. Дмитриева¹, М.Г. Ковальский¹

¹АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, 143966, Россия

²ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, 119526, Россия

³МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Предложена методика определения характеристик разрушения углерода вследствие его гетерогенного окисления, необходимых для прогнозирования обгара теплозащитных покрытий деталей ракетно-космической техники в условиях их эксплуатации в кислородсодержащей среде при воздействии на них высоких температур. Представлена принципиальная схема стендовых абляционных экспериментов для плотного углеродного материала. Описана расчетно-теоретическая модель абляции углерода, обусловленной процессом гетерогенного окисления материала при умеренных скоростях его абляции. Изложена методика решения обратной задачи математической физики по выявлению эффективных физических свойств углеродного материала (его кинетических констант), входящих в принятую модель абляции. Приведен пример решения оптимизационной задачи по определению кинетических констант гетерогенного окисления углерода.

Ключевые слова: математическая физика, обратная задача, углерод, кинетические константы, ВЧ-плазмотрон

Введение. При рассмотрении процессов, описываемых уравнениями математической физики, возникают проблемы, связанные с определением некоторых свойств исследуемой среды. Далее по тексту назовем эти свойства *кинетическими константами*, от которых зависит динамика изменения ее выходных характеристик.

Оптимальный путь решения этих проблем заключается в определении кинетических констант при проведении прямого физического эксперимента. В случае невозможности использования такого пути можно рекомендовать следующий алгоритм:

- установление вида искомых функциональных зависимостей, связывающих динамику изменения характеристик системы с подлежащими определению кинетическими константами;
- проведение систематических экспериментальных исследований в различных условиях функционирования среды с фиксацией динамики изменения ее выходных характеристик;
- решение обратной задачи по определению неизвестных кинетических констант из условия минимизации рассогласования между результатами расчетных и экспериментальных исследований.

Это общепринятый план проведения экспериментов, тем не менее он сопряжен с некоторыми сложностями. Рассмотрим один из возможных вариантов решения подобных задач на примере определения кинетических констант окисления углерода в высокотемпературном газовом потоке.

Углеродный материал был взят для рассмотрения в силу его высокой востребованности в ракетно-космической технике [1–3].

Физико-математическая модель абляции углеродного материала. Унос массы этих материалов сопровождается процессами окисления, сублимации, нитрирования и эрозии. При этом качественное проектирование тепловой защиты данного класса материалов неотделимо от необходимости исследования основных закономерностей протекания указанных процессов [4–6].

Изучение процесса окисления углерода целесообразно проводить при умеренных скоростях абляции материала, не превышающих значения, соответствующего максимально возможной скорости подвода окислителя к стенке за счет диффузии с внешней границы пограничного слоя. Под термином *стенка* здесь и далее по тексту понимают поверхность материала, обтекаемую газовым потоком.

Процессами сублимации и нитрирования можно пренебречь [7], эрозию углерода — исключить, ограничивая значение давления торможения газового потока [8].

Рассмотрим абляцию углерода в указанных условиях.

Общепризнано утверждение о гетерогенности этого явления, включающего в себя хемосорбцию окислителя стенкой, непосредственно гетерогенную химическую реакцию между углеродом и окислителем и десорбцию со стенки газообразных продуктов реакции [7]. Если процесс окисления углерода происходит в среде молекулярного кислорода, то возможны различные предположения о протекании этой реакции. Наиболее распространена гипотеза, согласно которой после хемосорбции углерода происходит распад молекул кислорода на атомы, непосредственно участвующие в химической реакции образования оксида углерода [9, 10]. При абляции материала в стационарной постановке массовые скорости указанных физико-химических превращений равны.

Результаты многочисленных экспериментальных исследований, проведенных в середине XX в. на лабораторных стендах для случая окисления плотного углерода в парах молекулярного кислорода, систематизированы в виде степенного закона Аррениуса [7]:

$$G_{\text{Ox}} = (p_{\text{O}_2, w})^n K \exp\left(-\frac{E}{R_{\text{un}} T_w}\right); \quad n = 0,5;$$
$$K = 6 \cdot 10^2 - 10^7; \quad E \approx 1,9 \cdot 10^8, \quad (1)$$

где G_{Ox} — массовая скорость окисления углерода, кг/(м²·с), индекс w означает стенку; p_i — парциальное давление i -го вещества, Па; n — порядок реакции; K — предэкспоненциальный множитель, кг/(м²·с·Па ^{n}); E — энергия активации, Дж/кмоль; R_{un} — универсальная газовая константа, Дж/(кмоль·К); T — температура, К.

Кинетические константы n , K , E определяются в прямом физическом эксперименте, проведенном в широком диапазоне изменения парциального давления молекулярного кислорода на стенке при настолько малых значениях скорости окисления, что этот процесс практически не влияет на значение давления, а зависимость $\ln(G_{Ox})$ от обратной температуры носит линейный характер.

Однако при достаточно больших значениях скорости окисления углерода в процессе его абляции перечень окислительных компонент, присутствующих на стенке, не ограничивается молекулярным кислородом. В первую очередь это касается атомарного кислорода и диоксида углерода [8]. Кинетические константы окисления углерода в парах этих веществ могут быть установлены только на базе решения обратной задачи по отношению к результатам систематических абляционных экспериментов.

Для расчета скорости окисления углерода в газовой смеси, в состав которой на стенке входят атомарный кислород, молекулярный кислород и диоксид углерода, воспользуемся аддитивным вариантом формулы (1), записанным в виде

$$G_{Ox} = \sum_{i=1}^3 (p_{i,w})^{n_i} K_i \exp\left(-\frac{E_i}{R_{un} T_w}\right). \quad (2)$$

Значениям индекса i , равным 1, 2 и 3, здесь соответствуют вещества O, O₂, CO₂.

Химический состав газовой смеси на стенке рассчитаем с использованием допущения об ограничении химического состава газовой смеси в пограничном слое набором веществ O, O₂, N₂, CO, CO₂, Ar [7], а также констант равновесия химических реакций, приведенных в работе [11], и балансов масс химических элементов на стенке, аналогии между процессами тепломассопереноса в пограничном слое и линейного приближения для учета эффекта блокировки теплообмена парами материала, вдуваемыми в ламинарный пограничный слой.

Указанные расчетные соотношения записываем в форме

$$\kappa_{eq, O_2}(T_w) = \frac{p_{O,w}^2}{p_{O_2,w}}; \quad \frac{\kappa_{eq, NO}(T_w)}{\sqrt{\kappa_{eq, N_2}(T_w)}} = \frac{p_{O,w} \sqrt{p_{N_2,w}}}{p_{NO,w}};$$

$$\begin{aligned} \kappa_{eq, N_2}(T_w) &= \frac{p_{N_2, w}^2}{p_{N_2, w}}; \quad \kappa_{eq, CO}(T_w) = \frac{p_{O, w} p_{C, w}}{p_{CO, w}}; \\ \kappa_{eq, C_2}(T_w) &= \frac{p_{C_2, w}^2}{p_{C_2, w}}; \quad \kappa_{eq, CO_2}(T_w) = \frac{p_{O, w} p_{CO, w}}{p_{CO_2, w}}; \\ \kappa_{eq, C_3}(T_w) &= \frac{p_{C_3, w}^3}{p_{C_3, w}}; \quad \frac{\kappa_{eq, CN}(T_w)}{\sqrt{\kappa_{eq, N_2}(T_w)}} = \frac{p_{C, w} \sqrt{p_{N_2, w}}}{p_{CN, w}}; \\ C_{O, w} + C_{CO_2, w} + C_{CO, w} \frac{M_O}{M_{CO}} + 2C_{CO_2, w} \frac{M_O}{M_{CO_2}} &= \frac{A_h}{A_h + G_{Ox}} \Theta_{O, out}; \\ C_{N_2, w} &= \frac{A_h}{A_h + G_{Ox}} \Theta_{N, out}; \\ C_{CO, w} \frac{M_C}{M_{CO}} + C_{CO_2, w} \frac{M_C}{M_{CO_2}} &= \frac{A_h}{A_h + G_{Ox}} \Theta_{C, out} + \frac{G_{Ox}}{A_h + G_{Ox}}; \\ A_h &= A_{h, im} - \gamma G_{Ox}, \end{aligned}$$

где C_i, M_i — соответственно массовая концентрация и молекулярная масса i -го вещества; $\Theta_{j, out}$ — концентрация j -го химического элемента на внешней границе пограничного слоя; $A_h, A_{h, im}$ — коэффициенты теплообмена на проницаемой и непроницаемой стенке, кг/(м²·с); γ — коэффициент вдува.

Для расчета скорости окисления углерода при заданных значениях кинетических констант и температуры стенки необходимо наличие информации о давлении в пограничном слое и коэффициенте теплообмена на непроницаемой стенке.

Методика определения кинетических констант окисления углерода. Данная методика базируется на использовании результатов систематических экспериментальных исследований конкретной композиции углеродного материала, полученных в высокоэнтропийной струе аэродинамической установки. Проведению экспериментальных исследований должны предшествовать калориметрические исследования, направленные на получение данных о коэффициенте теплообмена $A_{h, im, 0}$ на непроницаемой поверхности модели исходной формы в окрестности ее критической точки, а также измерение давления p_0 торможения потока газа на модели. При проведении экспериментальных исследований должна быть получена информация о темпе-

ратуре модели T_w в окрестности ее критической точки в течение всего времени эксперимента, а также о суммарном изменении длины образца Δ_{exp} за время эксперимента, определенном с помощью микрометра.

Необходимо также располагать информацией об элементарном химическом составе газовой струи. Если суммарное значение обгара модели в окрестности ее критической точки оказывается много меньше характерного размера модели, то влиянием этого фактора на изменение коэффициента теплообмена $A_{h,im}$ можно пренебречь. В противном случае обязательным является определение зависимости эффективного радиуса сферического скругления модели R_{sph} в окрестности ее критической точки от временной координаты τ [10].

Пусть для каждого k -го эксперимента из числа N_{exp} установлены следующие параметры:

- давление $p_{0,k}$ торможения газового потока на модели;
- коэффициент теплообмена $A_{h,im,k,0}$ на непроницаемой модели исходной формы в окрестности ее критической точки;
- суммарная величина обгара модели $\Delta_{\text{exp},k}$;
- табличная зависимость $T_{w,j,k}$, соответствующая временной шкале $\tau_{j,k}$, $j = \overline{1, N_{\tau,k}}$ ($N_{\tau,k}$ — количество узловых значений временной координаты);
- поправочная функция $\Psi_k(\tau)$, переводящая коэффициент теплообмена $A_{h,im,k,0}$ на модели исходной формы к ее аналогу $A_{h,im,k}$ на теле текущей обгарной формы.

Тогда любому заданному набору искомым кинетических констант окисления углерода может быть поставлено в соответствие расчетное значение обгара материала, рассчитываемое по формуле

$$\Delta_{\text{cal},k} = \frac{1}{\rho} \sum_{j=2}^{N_{\tau,k}} \frac{(G_{\text{Ox},j-1} + G_{\text{Ox},j})(\tau_j - \tau_{j-1})}{2},$$

где ρ — плотность материала, кг/м^3 ; $G_{\text{Ox},1} = 0$.

Тогда в качестве критерия оптимальности искомого решения задачи воспользуемся минимумом функционала вида

$$F = \frac{1}{N_{\text{exp}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{exp}}} \left| \frac{\Delta_{\text{cal},k}}{\Delta_{\text{exp},k}} - 1 \right|.$$

Решение сформулированной оптимизационной задачи находим с помощью одного из вариантов эвристического метода прямого поиска Хука — Дживса.

Методика проведения экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на 100-киловаттном высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4 (рис. 1). Подробное описание установки приведено в работе [12].

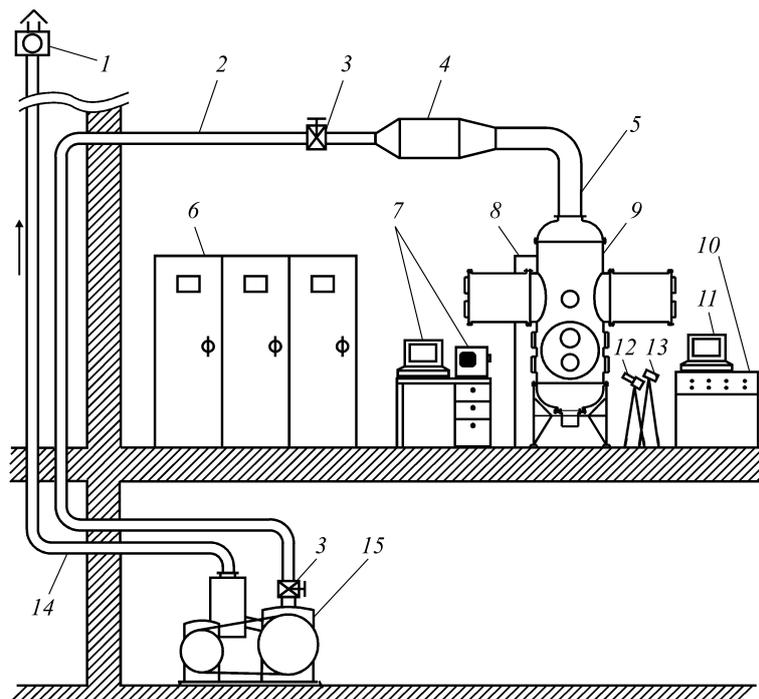


Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного индукционного плазмотрона ВГУ-4:

1 — вытяжной вентилятор; 2 — вакуумный трубопровод; 3 — вакуумные вентили; 4 — теплообменник «плазма — вода»; 5 — водоохлаждаемый вакуумный трубопровод; 6 — ВЧ-генератор; 7 — спектрометр; 8 — блок согласования плазменной нагрузки с ВЧ-генератором; 9 — испытательная камера; 10 — пульт управления; 11 — компьютер системы сбора и регистрации данных; 12 — термовизор; 13 — пирометр; 14 — вытяжной трубопровод; 15 — вакуумный насос

Все эксперименты проводились в свободной дозвуковой струе диссоциированного воздуха при давлении 0,01 МПа. Исследуемые образцы имели форму цилиндров диаметром 30 мм со сферическим притуплением (рис. 2).

Полнотелый образец первого типа состоял из затупленного по полусфере цилиндра диаметром 30 мм и цилиндрического хвостовика диаметром 13,8 мм и длиной 10 мм. Последний был вставлен в центральный цилиндрический канал водоохлаждаемой державки диаметром 30 мм, что обеспечивало центровку образца относительно державки.

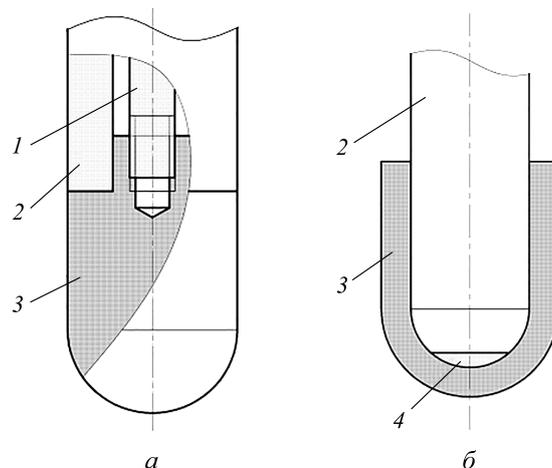


Рис. 2. Формы испытываемых полнотелого (а) и пустотелого (б) образцов и крепление их на державке:

1 — тяга; 2 — водоохлаждаемая державка; 3 — образец из углеродного материала;
4 — датчик теплового потока, показания которого не использовались

Пустотелый образец насаживали на цилиндрическую державку диаметром 20 мм со сферическим притуплением. Таким способом было обеспечено его охлаждение и создана возможность получения существенно более низких температур, чем при использовании полнотелого образца.

Для измерения тепловых потоков применялся стационарный водоохлаждаемый калориметр [12] в форме сферически затупленного цилиндра диаметром 30 мм, идентичной форме испытываемых образцов, изготовленных из углеродного материала. Такой же формы был энтальпиметр с отбором газа [13–16], который использовался для прямого измерения энтальпии торможения газового потока.

Носки обоих зондов так же, как и носки образцов, располагались на расстоянии 60 мм от выходного сечения разрядного канала.

Пример решения оптимизационной задачи по определению кинетических констант гетерогенного окисления углерода. В качестве примера рассмотрим решение данной задачи для одного из вариантов углеродного материала в дозвуковой воздушной струе ВЧ-плазматрона ВГУ-4 ИПМех РАН при давлении 0,01 МПа торможения газового потока на модели и радиусе 15 мм сферического затупления модели.

Выбор режима испытаний продиктован наличием калориметрических данных, необходимых для расчета коэффициента теплообмена на непроницаемой поверхности модели исходной формы в широком диапазоне изменения мощности стенда (рис. 3).

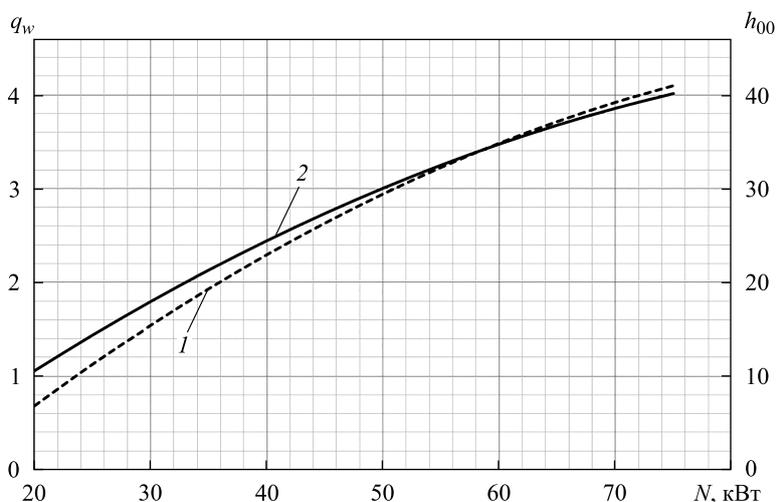


Рис. 3. Зависимость удельного теплового потока q_w в окрестности критической точки холодной модели и энтальпии h_{00} торможения газового потока от мощности стенда:

1 — удельный тепловой поток q_w , $\text{МВт}/\text{м}^2$; 2 — энтальпия торможения газового потока h_{00} , $\text{МДж}/\text{кг}$

Значение коэффициента теплообмена $A_{h,im,0}$ рассчитано по формуле

$$A_{h,im,0} = \frac{q_w}{(h_{00} - h_w)},$$

в которой для энтальпии h_w воздуха на холодной стенке использовалось ее значение $0,4 \text{ МДж}/\text{кг}$.

Расчетно-теоретический анализ результатов экспериментов, на базе которых получены оценки для кинетических констант окисления углерода, включал в себя данные по 16 экспериментам (таблица, рис. 4) *.

Исходные данные по режимам испытаний

Номер эксперимента	N , кВт	$A_{h,im,0}$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Номер эксперимента	N , кВт	$A_{h,im,0}$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
1	20	0,0670	6	35	0,0924
2	24	0,0805	7	30	0,0878
3	30	0,0878	8	24	0,0805
4	35	0,0924	9	20	0,0670
5	20	0,0670	10	35	0,0878

* Эксперименты 5–8 были короткими (порядка 90 с) и воспроизводили начальные участки экспериментов 1–4, на рис. 4 они не представлены.

Номер эксперимента	N , кВт	$A_{h,im,0}$, кг/(м ² ·с)	Номер эксперимента	N , кВт	$A_{h,im,0}$, кг/(м ² ·с)
11	35	0,0924	14	30	0,0878
12	24	0,0805	15	35	0,0824
13	35	0,0924	16	30	0,0878

Примечание. Тип образцов: 1–8 — полнотелые; 9–16 — пустотелые.

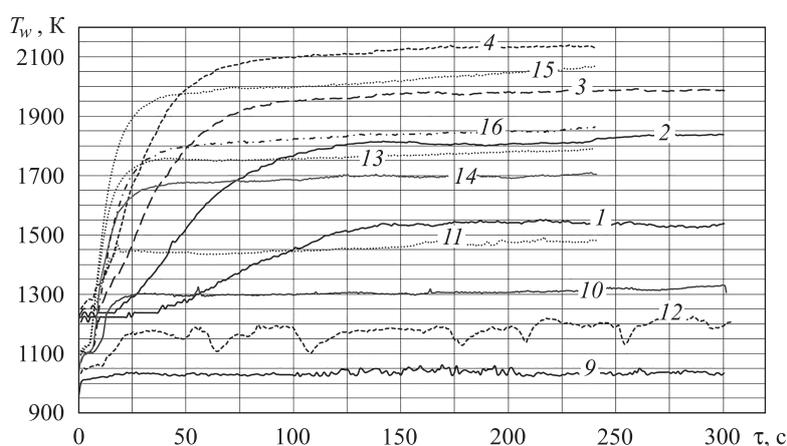


Рис. 4. Зависимость температуры модели в окрестности ее критической точки от временной координаты по данным 12 экспериментов (номер кривой соответствует номеру эксперимента)

При проведении анализа представленных экспериментальных данных пренебрегли возможностью участия в гетерогенных реакциях на стенке диоксида углерода. Необходимость в корректировке коэффициента теплообмена, обусловленной обгаром модели, не возникает вследствие незначительного значения последнего по сравнению с радиусом затупления исходной модели. Для коэффициента вдува использовалось его значение 0,65, хорошо зарекомендовавшее себя при сопоставлении численных решений уравнений ламинарного пограничного слоя на аблирующей углеродной стенке с такими же решениями, полученными в рамках аналогии между процессами тепло-массообмена [12].

В результате решения оптимизационной задачи по описанному выше алгоритму были определены значения кинетических констант окисления углерода атомарным и молекулярным кислородом, которые не противоречат их значениям (1), установленным в лабораторных условиях для молекулярного кислорода при близких к нулю скоростях окисления углерода.

Качество найденного решения задачи представлено на рис. 5, иллюстрирующем соответствие между расчетными и экспериментальными значениями обгара моделей для 16 экспериментов.

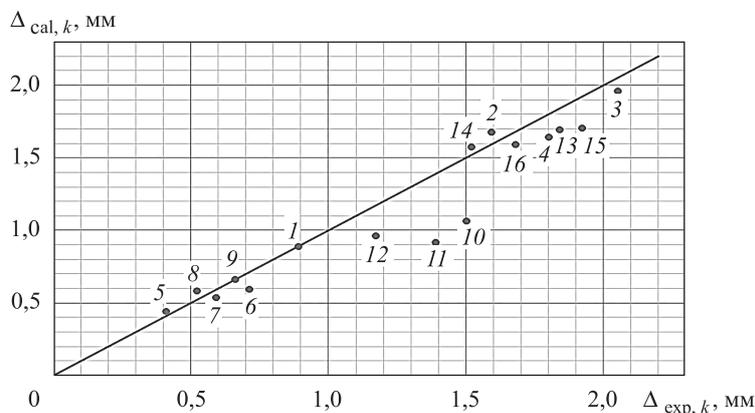


Рис. 5. Зависимость расчетных значений обгара модели от их экспериментального аналога (номер точки соответствует номеру эксперимента)

Найденному оптимальному решению задачи соответствуют расчетные зависимости от температуры стенки (рис. 6).

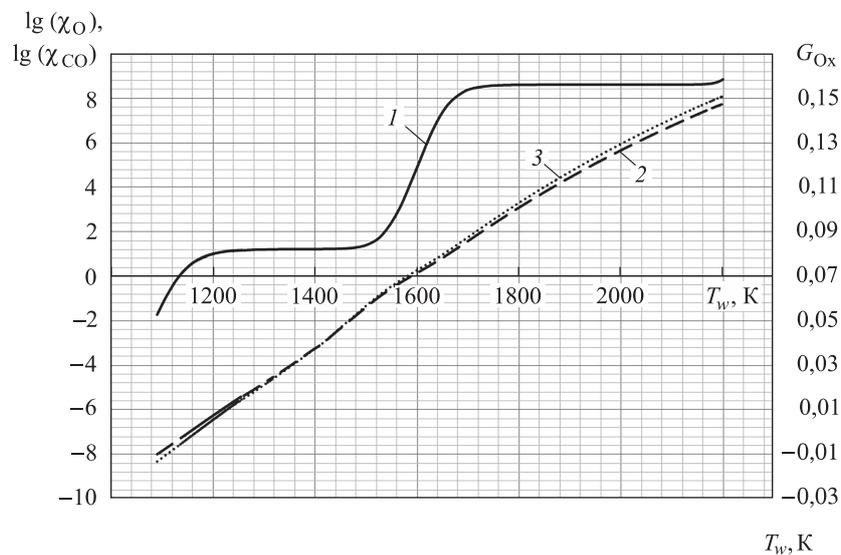


Рис. 6. Расчетные зависимости параметров, характеризующих процесс окисления углерода, от температуры стенки:

1 — скорость окисления углерода G'_{Ox} , выраженная в долях от коэффициента теплообмена на непроницаемой стенке; 2 — отношение χ_O парциального давления атомарного и молекулярного кислорода; 3 — отношение χ_{CO} парциального давления оксида и диоксида углерода

Отметим, что имеет место достаточно высокое качество согласования между расчетными и экспериментальными данными.

Тем не менее, возможно, есть условия для понижения уровня указанного рассогласования за счет использования конечных скоростей для гетерогенной химической реакции окисления оксида углерода на стенке.

Заключение. Предложен новый подход к определению эффективных физических свойств углеродных материалов (кинетических констант окисления), применимый для произвольных скоростей абляции материала. Указано направление дальнейших исследований повышения качества согласования расчетных и экспериментальных данных по обгару углеродных материалов, полученных при низких давлениях в струе ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 и низких давлениях торможения газового потока.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Резник С.В. Актуальные проблемы проектирования, производства и испытания ракетно-космических композитных конструкций. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3.
URL: <http://engjournal.ru/articles/638/638.pdf> (дата обращения 15.01.2018).
- [2] Savvatimskiy A. Carbon at High Temperatures. *Springer Series in Materials Science*, 2015, vol. 134, pp. 183–211.
- [3] Vignoles G.L., Lachaud J., Aspa Y., Goyh n che J.-M. Ablation of carbon-based materials: Multiscale roughness modelling. *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, issue 9, pp. 1470–1477.
- [4] Горский В.В. К вопросу о необходимости корректировки метода Ю.Д. Пчелкина, предназначенного для инженерного расчета параметров уноса массы углеродных материалов в окислительных газовых потоках. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 8.
URL: <http://engjournal.ru/articles/1645/1645.pdf> (дата обращения 15.01.2018).
- [5] Candler G.V., Alba Ch.R., Greendyke R.B. Characterization of Carbon Ablation Models Including Effects of Gas-Phase Chemical Kinetics. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*.
URL: <https://arc.aiaa.org/doi/full/10.2514/1.T4752>. DOI: 10.2514/1.T4752 (дата обращения 15.01.2018).
- [6] Turchi A., Congedo P.M., Magin Th.E. Thermochemical ablation modeling forward uncertainty analysis. Part I: Numerical methods and effect of model parameters. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, vol. 118, pp. 497–509.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article>.
DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.004 (дата обращения 15.01.2018).
- [7] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. *Тепловая защита*. Москва, Энергия, 1976. 391 с.
- [8] Горский В.В. *Теоретические основы расчета абляционной тепловой защиты*. Москва, Научный мир, 2015. 688 с.
- [9] Горский В.В., Ковальский М.Г., Оленичева А.А. Об определении кинетики окисления углерода атомарным кислородом на базе анализа результатов абляционных экспериментов в струях электродуговых установок. *Инженерно-физический журнал*, 2017, т. 90, № 1, с. 133–137.

- [10] Горский В.В., Золотарев С.Л., Оленичева А.А. Расчетно-экспериментальные исследования уноса массы углеродного материала на сублимационном режиме его термохимического разрушения. *Инженерно-физический журнал*, 2015, т. 88, № 1, с. 161–164.
- [11] Гурвич Л.В., Вейц И.В., Медведев В.А. и др. *Термодинамические свойства индивидуальных веществ*. Справочное издание в 4 т. Т. II, кн. 2. Москва, Наука, 1979, 344 с.
- [12] Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Высокочастотные индукционные плазмотроны серии ВГУ. *Актуальные проблемы механики: Физико-химическая механика жидкостей и газов*. Москва, Наука, 2010, с. 151–177.
- [13] Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Якушин М.И. Исследование теплообмена на моделях в дозвуковых струях индукционного плазмотрона. *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа*, 1983, № 6, с. 129–136.
- [14] Kolesnikov A.F., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A., Yakushin M.I. Study of Quartz Surface Catalcity in Dissociated Carbon Dioxide Subsonic Flows. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2000, vol. 37, no. 5, pp. 573–579.
- [15] Дорошенко В.М., Мысова В.М., Рулев Ю.К., Якушин М.И. Измерение энthalпии в дозвуковых высокотемпературных струях азота и воздуха на индукционном плазмотроне. *Инженерно-физический журнал*, 1987, т. 53, № 3, с. 492–493.
- [16] Kolesnikov A.F., Gordeev A.N., Vasil'evskii S.A., Sakharov V.I. Codes-to-experiment comparison for subsonic inductive air plasma flows in the IPG-4 plasmatron. *Proc. 7th Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics (April 17–19, Moscow, 2007)*. Moscow, ITP RAS, 2007, pp. 84–91.

Статья поступила в редакцию 08.02.2018

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Горский В.В., Гордеев А.Н., Дмитриева А.А., Ковальский М.Г. Методика решения обратных задач математической физики по определению эффективных физических свойств углеродных материалов абляционной тепловой защиты. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 8.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-8-1789>

Горский Валерий Владимирович — главный науч. сотр. АО «ВПК «НПО машиностроения», д-р техн. наук, профессор кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: абляционная тепловая защита, высокотемпературный тепломассообмен, численные методы решения уравнений математической физики.

Гордеев Андрей Николаевич — ведущий науч. сотр. ФГБУН «ИПМех РАН», канд. физ.-мат. наук. Область научных интересов: газовая динамика, абляционная тепловая защита, высокотемпературный тепломассообмен, численные методы решения уравнений математической физики.

Дмитриева Александра Анатольевна — инженер АО «ВПК «НПО машиностроения», аспирант. Область научных интересов: абляционная тепловая защита, высокотемпературный тепломассообмен, численные методы решения уравнений математической физики. e-mail: dmitrieva_aleks@mail.ru

Ковальский Михаил Георгиевич — инженер АО «ВПК «НПО машиностроения», аспирант. Область научных интересов: газовая динамика, абляционная тепловая защита, высокотемпературный тепломассообмен, численные методы решения уравнений математической физики.

Methods of solving inverse problems of mathematical physics to determine effective physical properties of carbon ablators for thermal protection

© V.V. Gorsky^{1,3}, A.N. Gordeev², A.A. Dmitrieva¹, M.G. Kovalsky¹

¹JSC MIC NPO Mashinostroyenia, Moscow region, Reutov, 143966, Russia

²Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russia

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper introduces the methods to determine characteristics of carbon degradation caused by its heterogeneous oxidation, which is necessary for predicting the ablation of rocket and space heat-protective equipment coatings parts in oxygen-containing medium under high temperature effect. The paper presents the basic scheme of ablation experiments for a dense carbon material and describes a carbon ablation calculation-theoretical model during the heterogeneous material oxidation process at moderate ablation rates. The paper considers the methods for solving the inverse problem of mathematical physics to identify effective physical properties of carbon material, i.e. its kinetic constants, which are included in the adopted ablation model. The study gives an example of solving an optimization problem to determine the kinetic constants of carbon heterogeneous oxidation.

Keywords: *mathematical physics, inverse problem, carbon, kinetic constants, HF plasmatron*

REFERENCES

- [1] Reznik S.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, iss. 3. Available at: <http://engjournal.ru/articles/638/638.pdf> (accessed January 15, 2018).
- [2] Savvatimsky A. *Springer. Series in Materials Science*, 2015, vol. 134, pp. 183–211.
- [3] Vignoles G.L., Lachaud J., Aspa Y., Goyh  n  che J.-M. *Composites Science and Technology*, 2009, vol. 69, iss. 9, pp. 1470–1477.
- [4] Gorsky V.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 8. Available at: <http://engjournal.ru/articles/1645/1645.pdf> (accessed January 15, 2018).
- [5] Candler G.V., Alba Ch.R., Greendyke R.B. Characterization of Carbon Ablation Models Including Effects of Gas-Phase Chemical Kinetics. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*. Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/full/10.2514/1.T4752> DOI: 10.2514/1.T4752 (accessed January 15, 2018).
- [6] Turchi A., Congedo P.M., Magin Th.E. *International Journal of Thermal Sciences*, 2017, vol. 118, pp. 497–509. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article> DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.004 (accessed January 15, 2018).
- [7] Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. *Teplovaya zaschita* [Heat protection]. Moscow, Energia Publ., 1976, 391 p.
- [8] Gorsky V.V. *Teoreticheskie osnovy rascheta ablyatsionnoy teplovoy zaschity* [Theoretical basis of calculating ablative thermal protection]. Nauchny mir Publ., Moscow, 2015, 688 p.

- [9] Gorsky V.V., Kovalsky M.G., Olenicheva A.A. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 1, pp. 133–137.
- [10] Gorsky V.V., Zolotarev S.L., Olenicheva A.A. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 161–164.
- [11] Glushko V.P., Gurvich L.V., Bergman G.A. et al. *Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv. V 4 tomakh. Tom 2. Kn. 2* [Thermodynamic properties of individual substances. Reference edition. In 4vols. Vol. 2. Book 2]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 341 p.
- [12] Gordeev A.N., Kolesnikov A.F. Vysokochastotnye induktsionnye plazmotrony serii VGU [High-frequency induction plasma torches of VSU series]. *Aktualnye problemy mekhaniki: Fiziko-himicheskaya mekhanika zhidkostey i gazov* [Actual problems of mechanics: Physical and chemical mechanics of liquids and gases]. Moscow, Nauka Publ., 2010, pp. 151–177.
- [13] Gordeev A.N., Kolesnikov A.F., Yakushin M.I. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza — Fluid Dynamics. A Journal of Russian Academy of Sciences*, 1983, no. 6, pp. 129–136.
- [14] Kolesnikov A.F., Pershin I.S., Vasilevsky S.A., Yakushin M.I. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2000, vol. 37, no. 5, pp. 573–579.
- [15] Doroshenko V.M., Mysova V.M., Rulev Yu.K., Yakushin M.I. *Inzhenerno-fizichesky zhurnal — Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1987, vol. 53, no. 3, pp. 492–493.
- [16] Kolesnikov A.F., Gordeev A.N., Vasilevsky S.A., Sakharov V.I. Codes to experiment comparison for subsonic inductive air plasma flows in the IPG-4 plasmatron. *Proc. of the 7th Int. Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics. The Institute for Information Transmission Problems, RAS. Moscow, 17–19 April 2007*, IITP RAS, 2007, pp. 84–91.

Gorsky V.V., Chief Research Fellow, JSC MIC NPO Mashinostroyenia, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: ablative thermal protection, high-temperature heat and mass transfer, numerical methods for solving equations of mathematical physics.

Gordeev A.N., Leading Research Fellow, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sc. (Phys.-Math.). Research interests: gas dynamics, ablative thermal protection, high-temperature heat and mass transfer, numerical methods for solving equations of mathematical physics.

Dmitrieva A.A., engineer of the JSC MIC NPO Mashinostroyenia. Research interests: ablative thermal protection, high-temperature heat and mass transfer, numerical methods for solving equations of mathematical physics. e-mail: dmitrieva_aleks@mail.ru

Kovalsky M.G., engineer, JSC MIC NPO Mashinostroyenia. Research interests: gas dynamics, ablative thermal protection, high-temperature heat and mass transfer, numerical methods for solving equations of mathematical physics.