

Определение кинетических констант гетерогенного окисления углерода на сублимационном режиме его абляции по результатам суммарных абляционных экспериментов

© В.В. Горский^{1,2}, А.А. Дмитриева¹

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

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В настоящее время углеродные материалы широко используются в абляционных теплозащитных покрытиях, применяемых в ракетно-космической технике. В связи с этим исследование механизма их термохимического разрушения, в том числе при воздействии высоких температур (сублимационный режим), является актуальным. Проведение натурных экспериментов для получения данных о поведении материала в тех или иных условиях крайне дорого, а в ряде случаев недоступно. Альтернативным способом изучения механизма разрушения углеродных материалов являются стендовые эксперименты с последующим переносом полученных результатов на натурные условия. Представлена принципиальная схема стендовых абляционных экспериментов для плотного углеродного материала. Описана расчетно-теоретическая модель абляции углерода, обусловленной процессом гетерогенного окисления материала на сублимационном режиме. Приведены методика определения кинетических констант, входящих в принятую модель абляции, и пример решения оптимизационной задачи по определению кинетических констант гетерогенного окисления углерода. Предложена методика позволяет определить характеристики разрушения углерода вследствие его гетерогенного окисления на сублимационном режиме, которые можно использовать для прогнозирования обгара теплозащитных покрытий изделий ракетно-космической техники в условиях их эксплуатации в кислородсодержащей среде при воздействии высоких температур.

Ключевые слова: углерод, абляция, окисление, кинетические константы, закон Аррениуса

Введение. Углеродные материалы широко используются в абляционных теплозащитных покрытиях, применяемых в ракетно-космической технике [1–3]. Унос массы этих материалов сопровождается протеканием ряда процессов, к которым относятся: окисление, сублимация, нитрирование и эрозия. Поэтому качественное проектирование тепловой защиты покрытий этого класса обуславливает необходимость исследования основных закономерностей протекания данных процессов [4–6].

Процесс окисления углерода является гетерогенным и включает в себя [7]:

- хемосорбцию окислителя на поверхности (стенки) материала, обтекаемой газовым потоком;

- непосредственно гетерогенную химическую реакцию между углеродом и окислителем;
- десорбцию со стенки газообразных продуктов реакции.

Если процесс окисления углерода происходит в среде молекулярного кислорода, то возможны различные предположения о том, как протекает эта реакция. Наиболее часто принимается, что за процессом хемосорбции кислорода происходит распадение его молекул на атомы, которые уже непосредственно участвуют в химической реакции с образованием оксида углерода [8, 9]. При рассмотрении процесса абляции материала в квазистационарной постановке массовые скорости приведенных физико-химических превращений равны между собой.

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]:

$$G_{Ox} = (p_{O_2,w})^n K \exp\left(-\frac{E}{R_{un}T_w}\right), \quad (1)$$

где G_{Ox} — массовая скорость окисления углерода, кг/(м²·с); p_i — парциальное давление i -го вещества, Па; n — показатель степени (порядок реакции), $n = 5$; K — предэкспоненциальный множитель, $K = 6 \cdot (10^2 \dots 10^7)$ кг/(м²·с·Па ^{n}); T — температура, К; E — энергия активации, $E \approx 1,9 \cdot 10^8$ Дж/кмоль; R_{un} — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); индекс «w» относится к стенке.

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

Однако на диффузионном и сублимационном режимах абляции углерода свободный кислород на стенке находится не в молекулярном, а в атомарном состоянии. Получение же кинетических констант окисления углерода в парах атомарного кислорода в прямом физическом эксперименте не представляется возможным. Поэтому единственно возможным способом получения данных является анализ результатов абляционных экспериментов, проведенных при нахождении кислорода на стенке в атомарном состоянии, в частности сублимационном режиме абляции углерода [10].

Впервые попытка решения сформулированной задачи для сублимационного режима абляции углерода была предпринята в работе [8],

в которой минимизация рассогласования между расчетными и экспериментальными данными проводилась для незначительной совокупности измерений скорости абляции и температуры стенки. Поскольку скорость абляции материала при этом определялась путем дифференцирования функции $x(\tau)$, то такой подход к решению задачи условно можно назвать дифференциальным методом.

В данной работе применяется другой подход к решению приведенной задачи (назовем его интегральным методом), который базируется на минимизации рассогласования между расчетными и экспериментальными данными по изменению длины образца за полное время его теплового нагружения.

Цель работы — разработка методики решения приведенной задачи и получение данных о кинетических константах гетерогенного окисления углерода атомарным кислородом на сублимационном режиме его абляции с помощью интегрального метода.

Объектом исследований являются результаты абляционных экспериментов по изучению плотного углеродного материала в струе электродуговой установки (стенда) ТТ-1 ФГУП «ЦНИИмаш» [8, 9].

Принципиальная схема проведения абляционных экспериментов на установке ТТ-1 приведена на рис. 1 [11].

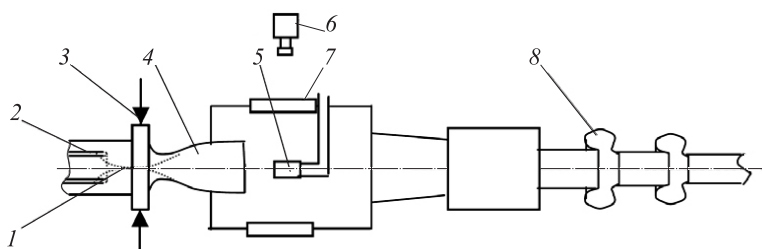


Рис. 1. Принципиальная схема проведения испытаний на установке ТТ-1:

1 — электрическая дуга; 2 — электрод; 3 — коллектор подвода рабочего газа; 4 — сверхзвуковое профилированное сопло; 5 — образец; 6 — кинокамера; 7 — оптическое окно; 8 — эжектор

Стенд относится к высокоэнтальпийным установкам ТТ-1, он оснащен электродуговым подогревателем мощностью до 1,4 МВт. Образцы теплозащитного материала подвергаются аэродинамическому нагреву в сверхзвуковом потоке низкотемпературной (5 000...10 000 К) воздушной плазмы. Геометрическая форма исследуемых образцов приведена на рис. 2 (индексом «*» обозначен справочный размер).

Результаты диагностики струи ТТ-1 и измерения обгара материала за время его теплового нагружения приведены в таблице, в которой номера экспериментов, не представленных в работе [8], отмечены

звездочкой; p_0 — давление торможения газового потока; $A_{h,im,0}$ — коэффициент теплообмена на непроницаемой поверхности образца исходной формы; Δ_{Exp} — сведения о наличии или отсутствии данных по обгару образца за все время его теплового нагружения.

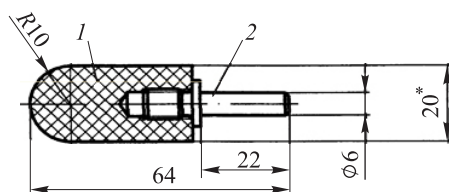


Рис. 2. Геометрическая форма испытываемого образца:
1 — углеродный материал; 2 — металлический хвостовик

Результаты диагностики струи стенда ГТ-1 и измерения обгара

Номер эксперимента	p_0 , МПа	$A_{h,im,0}$, кг/(м ² ·с)	Δ_{Exp}
1	0,275	2,280	—
2	0,300	2,336	—
3	0,284	2,169	—
4	0,281	2,230	—
5	0,297	2,280	—
6	0,299	2,370	Есть
7*	0,287	2,310	Есть
8*	0,030	0,767	Есть
9*	0,030	0,774	Есть
10*	0,023	0,681	Есть

Коэффициент теплообмена $A_{h,im}$ на непроницаемой стенке текущей обгарной формы рассчитывали по формуле

$$A_{h,im} = A_{h,im,0} \sqrt{R_0/R_{Sph}}$$

где R_0 — радиус сферического затупления исходного образца; R_{Sph} — эффективный радиус сферического затупления образца в окрестности его критической точки, определяемый видеосъемкой в процессе эксперимента.

Помещенные в таблицу данные получены с помощью калориметрического зонда, представляющего информацию об интегральном тепловом потоке, проходящем через его полусферическую поверхность, и о давлении торможения набегающего на зонд газового потока.

Причем в отличие от работы [9] поправку к коэффициенту теплообмена, полученную с помощью дополнительного измерения давления на боковой поверхности зонда (это было связано с отсутствием уверенности в достаточно высоком качестве указанной дополнительной информации по условиям обтекания зонда), не вводили. Коэффициенты теплообмена, приведенные в таблице, отличаются от их значений из работы [9] не более чем на 10 %.

Приведенных экспериментальных данных достаточно для решения обратной задачи определения эффективных физических свойств материала на базе сопоставления расчетных и экспериментальных данных по его суммарным абляционным характеристикам.

Физико-математическая постановка задачи. В расчетно-теоретической модели абляции углерода принято, что удельная массовая скорость G_{AbI} протекания этого процесса является алгебраической суммой ее составляющих G_{Ox} и G_{Sub} , обусловленных протеканием процессов окисления и сублимации углерода.

При расчете G_{Ox} приняты следующие предположения:

- суммарная скорость протекания процесса является алгебраической суммой скоростей окисления, обусловленной наличием на стенке атомарного и молекулярного кислорода;
- для расчета скорости окисления углерода, обусловленной наличием на стенке атомарного кислорода, используется уравнение (1), установленное экспериментально для окисления углерода в парах молекулярного кислорода.

Таким образом, можно записать

$$G_{\text{Ox}} = (p_{\text{O},w})^{n_{\text{O}}} K_{\text{O}} \exp\left(-\frac{E_{\text{O}}}{R_{\text{un}} T_w}\right) + (p_{\text{O}_2,w})^{n_{\text{O}_2}} K_{\text{O}_2} \exp\left(-\frac{E_{\text{O}_2}}{R_{\text{un}} T_w}\right). \quad (2)$$

Расчет скорости сублимации углерода осуществляется в рамках предложенного в работе [12] описания этого процесса в неравновесной постановке с использованием формулы Ленгмюра — Кнудсена [13]:

$$G_{\text{Sub}} = \sum_{i=1}^3 \zeta_i \cdot \frac{p_{\text{Ci},\oplus}(T_w) - p_{\text{Ci},w}}{\sqrt{2\pi R_{\text{un}} T_w / M_{\text{Ci}}}}, \quad (3)$$

где ζ_i — коэффициент аккомодации стенки по отношению к молекулам сорта Ci , индексом \oplus обозначается насыщенный пар.

Для расчета химического состава газовой смеси на стенке, знание которого необходимо для расчета обеих составляющих скорости абляции, применяются:

- стандартная система нелинейных алгебраических уравнений, включающая в себя балансы масс химических элементов, закон

Дальтона и константы равновесия химических реакций образования молекулярных веществ из атомарных веществ;

- допущение о том, что стенка является абсолютно каталитической;
- аналогия между процессами теплообмена в пограничном слое;
- допущение о линейности эффекта вдува паров абляции в пограничный слой.

Расчетные соотношения имеют следующий вид:

$$p_{O,w}^2 / p_{O_2,w} = k_{eq,O_2}(T_w); \quad p_{N,w} p_{O,w} / p_{NO,w} = k_{eq,NO}(T_w);$$

$$p_{N,w}^2 / p_{N_2,w} = k_{eq,N_2}(T_w); \quad p_{C,w} p_{O,w} / p_{CO,w} = k_{eq,CO}(T_w);$$

$$p_{C,w}^2 / p_{C_2,w} = k_{eq,C_2}(T_w); \quad p_{C,w} p_{O,w}^2 / p_{CO_2,w} = k_{eq,CO_2}(T_w);$$

$$p_{C,w}^3 / p_{C_3,w} = k_{eq,C_3}(T_w); \quad p_{C,w} p_{N,w} / p_{CN,w} = k_{eq,CN}(T_w);$$

$$z_{O,w} + 2z_{O_2,w} + z_{NO,w} + z_{CO,w} + 2z_{CO_2,w} = A_h \Theta_{O,out} / [M_O (A_h + G_{Abl})]; \quad (4)$$

$$z_{N,w} + 2z_{N_2,w} + z_{NO,w} + z_{CN,w} = A_h \Theta_{N,out} / [M_N (A_h + G_{Abl})];$$

$$z_{C,w} + 2z_{C_2,w} + 3z_{C_3,w} + z_{CO,w} + z_{CO_2,w} + z_{CN,w} = G_{Abl} / [M_C (A_h + G_{Abl})]; \quad (5)$$

$$z_{i,w} = p_{i,w} / M; \quad \sum_i z_{i,w} M_i = 1; \quad M = 1 / \sum_i z_{i,w}.$$

$$A_h = A_{h,im} - \gamma G_{Abl}; \quad G_{Abl} = G_{Ox} + G_{Sub}.$$

Здесь $k_{eq,i}$ — константа равновесия химической реакции образования i -го молекулярного вещества из атомов, значения которой в широком интервале изменения температуры приведены в работе [10]; M_i, M — молекулярные массы i -го вещества и газовой смеси, кг/кмоль; $\Theta_{j,out}$ — концентрация j -го химического элемента на внешней границе пограничного слоя; $A_h, A_{h,im}$ — коэффициенты теплообмена на проницаемой и непроницаемой стенках, кг/(м² · с); G_{Abl} — массовая скорость абляции углерода; γ — коэффициент вдува.

Все термодинамические свойства индивидуальных веществ, входящие в сформулированную постановку задачи в виде функций температуры стенки, рассчитаны с помощью табличных данных [14].

Методика решения обратной задачи. Процедура получения экспериментальных данных по абляции углеродного материала характеризуется двумя принципиальными особенностями.

1. Вследствие высокой теплопроводности материалов этого класса в процессе проведения экспериментальных исследований никогда не устанавливается так называемый квазистационарный режим абляции, на котором скорость разрушения и температура материала перестают зависеть от временной координаты. Это обстоятельство позволяет существенно упростить методику проведения экспериментальных исследований, так как обеспечение в них квазистационарного режима разрушения теплозащитного эксперимента сопряжено с необходимостью преодоления значительных технических проблем.

2. Для материалов этого класса линейная скорость абляции в струе газа заданного элементарного химического состава зависит только от температуры стенки, давления и коэффициента теплообмена. Вследствие этого удастся качественно повысить информативность абляционного эксперимента. Однако возникают определенные проблемы, связанные с качеством измерения скорости и температуры абляции материала и с определением коэффициента теплообмена на непроницаемой поверхности образца текущей обгарной формы.

В процессе проведения абляционного эксперимента рассматриваемого типа удастся получить только информацию о зависимости положения критической точки образца, его обгарной форме и температуры стенки в окрестности ее критической точки от временной координаты.

В работе [8] показано, что в экспериментах № 1, 3 и 5 наблюдаются:

- диффузионный режим абляции углерода, поэтому для определения кинетических констант окисления углерода на сублимационном режиме его абляции эти эксперименты не подходят;
- удовлетворительное соответствие между скоростями абляции, рассчитанными в приближении диффузионного горения углерода и зафиксированными в экспериментах, что свидетельствует об обоснованности пренебрежения эрозией углерода в рассматриваемой серии испытаний.

В экспериментах № 2, 4, 6 и 7 реализуется ярко выраженный сублимационный режим абляции материала, что позволило использовать результаты этих испытаний для определения кинетических констант окисления углерода дифференциальным методом [8].

В то же время в рамках интегрального метода решения рассматриваемой задачи могут быть использованы только результаты последних пяти экспериментов, для которых известна информация об обгаре образцов за все время их теплового нагружения.

На рис. 3 приведены зависимости температуры стенки в окрестности критической точки образца, зафиксированные в экспериментах № 6–10, которые были использованы при решении поставленной задачи численным методом.

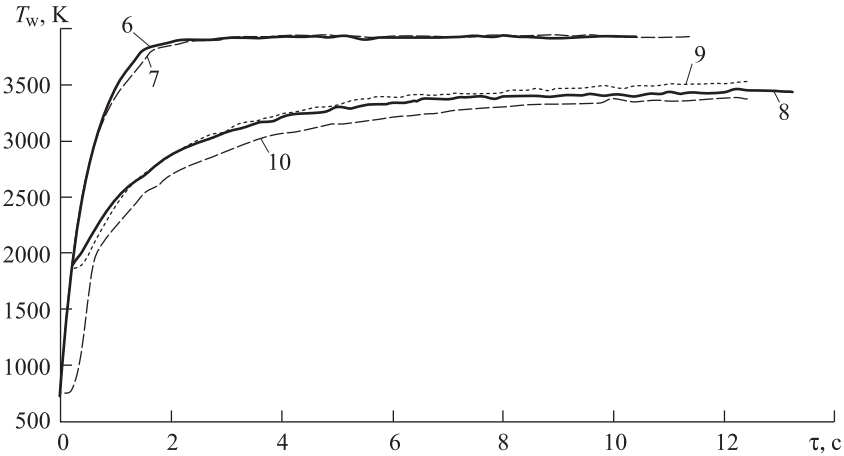


Рис. 3. Зависимость температуры стенки в окрестности критической точки образца от временной координаты (цифры над кривыми — номер эксперимента)

Если для каждого k -го эксперимента из числа экспериментов N_{Exp} установлены давление на модели p_k , коэффициент теплообмена $A_{h,im,k}$ на непроницаемой стенке, табличные зависимости $T_{w,j,k}$, соответствующие временным шкалам $\tau_{j,k}$, $j = \overline{1, N_{\tau,k}}$, то любому заданному набору искомым кинетических коэффициентов может быть поставлено в соответствие расчетное значение обгара материала в миллиметрах, рассчитываемого по формуле

$$\Delta_{\text{Cal},k} = \frac{10^3}{\rho} \sum_{j=2}^{N_{\tau,k}} (G_{\text{Ox},j-1} + G_{\text{Ox},j}) (\tau_j - \tau_{j-1}) / 2.$$

Тогда в качестве критерия оптимальности искомого решения задачи можно использовать минимум функционала

$$F = \frac{1}{N_{\text{Exp}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{Exp}}} |\Delta_{\text{Cal},k} - \Delta_{\text{Exp},k}|.$$

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

Пример решения оптимизационной задачи по определению кинетических констант гетерогенного окисления углерода. Ниже проиллюстрирована возможность применения сформулированного выше интегрального метода для определения кинетических констант, входящих в уравнение (1), аппроксимирующее зависимость скорости окисления углерода от температуры стенки. Используются необходимые для применения данного метода экспериментальные данные по зависимости температуры стенки в окрестности критической

точки образца от временной координаты и обгара его за все время теплового нагружения (см. табл., эксперименты № 6–10). Кроме того, для корректировки коэффициента теплообмена на непроницаемой стенке, обусловленной обгаром материала в экспериментах № 6 и № 7, используются результаты изменения обгарной формы образца с течением времени, полученные путем аппроксимации соответствующих результатов видеосъемки.

При этом необходимость в проведении аналогичной корректировки для остальных экспериментов из числа рассматриваемых, отсутствует в связи с незначительностью обгара материала в процессе проведения эксперимента (см. таблицу).

В процессе решения данной оптимизационной задачи определяли значения кинетических коэффициентов n_O, K_O, E_O . Для кинетических коэффициентов $n_{O_2}, K_{O_2}, E_{O_2}$, не оказывающих влияния на искомое решение задачи, использовали их значения, приведенные в работе [9], а для коэффициентов аккомодации стенки по отношению к чисто углеродным соединениям — их значения из работы [12], $\zeta_C = 0,3, \zeta_{C_2} = 0,5, \zeta_{C_3} = 0,1$.

Установлены значения искомых кинетических коэффициентов, незначительно отличающиеся от значений, установленных в работе [12], что свидетельствует о возможности использования дифференциального подхода при отсутствии экспериментальных данных по суммарной величине изменения длины образца за все время его теплового нагружения.

Зависимость $\Delta_{Cal,k} (\Delta_{Exp,k})$ на рис. 4 свидетельствует о достаточно высоком качестве описания экспериментальных данных в рамках принятой физико-математической модели абляции углерода.

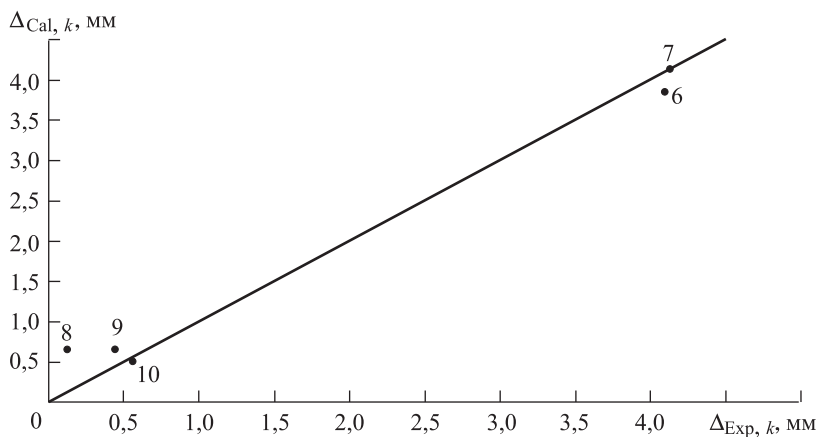


Рис. 4. Зависимость расчетной величины обгара образцов от его экспериментального значения

Согласно данным на рис. 4, наблюдается вполне удовлетворительное соответствие между расчетными и экспериментальными данными за исключением эксперимента № 8. В то же время при близких к нулю значениях обгара материала применение любого подхода к определению кинетических констант окисления углерода не представляется возможным в связи с тем, что точность измерения температуры образца на данном стенде недостаточно высока [8, 9].

На рис. 5 приведена зависимость безразмерной скорости G'_{Ab1} абляции углерода, выраженной в долях от коэффициента теплообмена $A_{h,im}$ на непроницаемой стенке, от ее температуры, полученная соответственно интегральным и дифференциальным методами. Для дифференциального метода использованы значения кинетических констант, приведенные в работе [8], экспериментальные значения скорости абляции обозначены кружками.

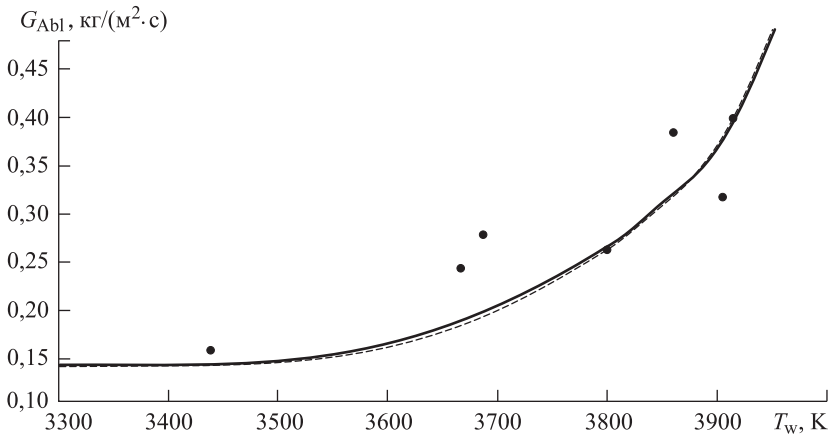


Рис. 5. Сопоставление кинетических кривых скорости абляции углерода, установленных интегральным (сплошная кривая) и дифференциальным (штриховая) методами

Заклучение. Предложен новый подход к решению обратной задачи определения кинетических коэффициентов окисления углерода. Установлено удовлетворительное соответствие между расчетными и экспериментальными данными. Ограничение по применимости полученных кинетических кривых окисления по давлению набегающего потока не возникает, поскольку изменение формы зависит только от парциального давления окислителя, которое в рамках эксперимента изменялось в достаточно широких пределах.

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 19.07.2017).

- [2] Savvatimskiy A. Carbon at High Temperatures. *Springer Series in Materials Science*, 2015, vol. 134, pp. 246.
- [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, iss. 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 19.07.2017).
- [5] Candler G.V., Alba C.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 19.07.2017).
- [6] Turchi A., Congedo P.M., Magin T.E. Thermochemical Ablation Modeling Forward Uncertainty Analysis. P. 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 19.07.2017).
- [7] Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. *Тепловая защита*. Москва, Энергия, 1976, 391 с.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Горский В.В. Теоретические основы расчета абляционной тепловой защиты. Москва, Научный мир, 2015, 688 с.
- [11] Землянский Б.А., ред. *Проблемы тепломассообмена в ракетно-космической технике. Избранные труды 1962-2015*. Королев, ЦНИИмаш, 2015, 372 с.
- [12] Анфимов Н.А. Горение графита в потоке воздуха при высоких температурах. *Изв. АН СССР. Механика и машиностроение*, 1965, № 5, с. 3–11.
- [13] Полежаев Ю.В. *Сублимация. Физический энциклопедический словарь*. Москва, Советская энциклопедия, 1966, т. 5, с. 101.
- [14] Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание. В 4 т. В.П. Глушко, Л.В. Гурвич, Г.А. Бергман и др., ред. коллегия. Москва, Наука, 1979, т. II, кн. 2, 341 с.

Статья поступила в редакцию 03.07.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Горский В.В., Дмитриева А.А. Определение кинетических констант гетерогенного окисления углерода на сублимационном режиме его абляции по результатам суммарных абляционных экспериментов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 12.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-12-1708>

Горский Валерий Владимирович — главный научный сотрудник АО «ВПК «НПО машиностроения», д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: абляционная тепловая защита, высокотемпературный теплообмен, численные методы решения уравнений математической физики. e-mail: gorskmat@yandex.ru

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

Defining the kinetic constants of heterogeneous carbon oxidation under the sublimational condition of its ablation according to the results of the combined ablative experiments

© V.V. Gorskiy^{1,2}, A.A. Dmitrieva¹

¹Joint Stock Company MIC Mashinostroyenia, Reutov, 143966, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Nowadays carbon-based materials are widely used in the ablating shell structures applied in the rocket and space equipment. In this regard, the analysis of their thermochemical destruction, including the destruction under high-temperature exposure (sublimational condition), is essential. It is very expensive and in many cases impossible to conduct full-scale experiments in order to obtain the data concerning the behaviour of the material in the particular conditions. The bench scale testing resulting in the relocation to the full-scale conditions is an alternative way of studying the mechanism of the carbon-based materials destruction. We introduce a full-scale ablation experiments framework for the dense of carbon material. The article describes a theoretically-calculated model of the carbon ablation determined by the process of the material heterogeneous oxidation under sublimational condition. We present a strategy for defining the kinetic constants comprised into the accepted ablation model and an example of solving the optimization problem of defining the kinetic constants of the carbon heterogeneous oxidation. The proposed strategy allows determining the characteristics of carbon destruction due to its heterogeneous oxidation under sublimational condition that can be used for forecasting the burn of the rocket and space equipment thermal-protective coating when it is exploited in the presence of oxygen under the impact of high temperatures.

Keywords: carbon, ablation, oxidation, kinetic constants, Arrhenius law

REFERENCES

- [1] Reznik S.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, issue. 3. Available at: <http://engjournal.ru/articles/638/638.pdf> (accessed June 19, 2017).
- [2] Savvatimskiy A. *Carbon at High Temperatures*. Switzerland, Springer International Publ., 2015, vol. 134, 246 p.
- [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, no. 9, pp. 1470–1477.
- [4] Gorskiy V.V. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, no. 8. Available at: <http://engjournal.ru/articles/1645/1645.pdf> (accessed June 19, 2017).
- [5] Candler G.V., Alba C.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> (accessed June 19, 2017). DOI: 10.2514/1.T4752
- [6] Turchi A., Congedo P.M., Magin T.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.

Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article> (accessed June 19, 2017). DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.004

- [7] Polezhaev Yu.V., Yurevich F.B. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 391 p.
- [8] Gorskiy V.V., Kovalskiy M.G., Olenicheva A.A. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — The Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 1, pp. 133–137.
- [9] Gorskiy V.V., Zolotarev S.L., Olenicheva A.A. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal — The Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 161–164.
- [10] Gorskiy V.V. *Teoreticheskie osnovy rascheta ablyatsionnoy teplovoy zashchity* [The theoretical basics of calculating the ablation thermal protection]. Moscow, Nauchnyy mir Publ., 2015, 688 p.
- [11] Zemlyanskiy B.A. *Problemy teplomassoobmena v raketno-kosmicheskoy tekhnike. Izbrannyye trudy 1962–2015* [The problems of heat-mass exchange in rocket and space equipment. Selecta 1962–2015]. Korolev, TsNIIImash Publ., 2015, 372 p.
- [12] Anfimov N.A. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Mekhanika i mashinostroenie — Journal of the Academy of Sciences, USSR. Engineering Sciences Branch. Mechanics and Machine Building*, 1965, no. 5, pp. 3–11.
- [13] Polezhaev Yu.V. *Sublimatsiya. Fizicheskiy entsiklopedicheskiy slovar* [Sublimation. Physics encyclopedic dictionary]. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1966, vol. 5, pp. 101.
- [14] Glushko V.P., ed. *Termodinamicheskie svoystva individualnykh veshchestv* [Thermodynamic properties of individual substances]. Moscow, Nauka Publ., vol. 2, book 2, 341 p.

Gorskiy V.V., Chief Research Fellow, Joint Stock Company MIC Mashinostroyeniya, Dr. Sc. (Eng.), Professor, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include: ablative thermal protection, high-temperature heat-mass exchange, numerical computations of mathematical physics equations. e-mail: gorskknat@yandex.ru

Dmitrieva A.A., engineer, Joint Stock Company MIC Mashinostroyeniya, post-graduate student. Research interests include: ablative thermal protection, high-temperature heat-mass exchange, numerical computations of mathematical physics equations. e-mail: dmitrieva_alekc@mail.ru