

HF-Plasmatron IPG-4 in IPMech RAS as an Instrument for Determination of Kinetics of Heterogeneous Chemical Reactions on the Surface of Carbon Material

V.V. Gorskij^{1,2}, A.N. Gordeev³, A.A. Dmitrieva¹, A.F. Kolesnikov³

¹ JSC «MIC «NPO Mashinostroyeniya», Moscow region, Reutov, 143966, Russia

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

³ Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119526, Russia

gorskmat@yandex.ru, a_gord@mail.ru, a.a.dmitrieva@vpk.npomash.ru, koles@ipmnet.ru

Abstract

Experimental investigations were carried out on the destruction of thermal protection in oxidizing subsonic jets of the high-frequency plasmatron IPG-4 in IPMech RAS. On the basis of experimental data, the effective physical properties of the carbon material were determined with oxidation by molecular and atomic oxygen. All experiments were made in conditions for which dependences of coefficient of heat exchange and pressure of braking in a critical point of model from installation power have been defined.

Kinetic constants of this process were defined from the solution of the inverse problem of reproduction in calculations of the total rate of ablation at the fixed dependences of temperature of an ablation on time received as a result results of systematic ablation experiments.

It was found that a satisfactory agreement between calculated and theoretical and experimental data on the ablation of carbon material for use in the Arrhenius laws, which were established in a direct physical experiment for molecular oxygen. This conclusion applies to both molecular and atomic oxygen.

Keywords: carbon, ablation, oxidation, sublimation, kinetic constants.

УДК 533.16

ВЧ-плазматрон ВГУ-4 ИПМех РАН как инструмент для исследования кинетики гетерогенных химических реакций, протекающих на поверхности углеродного материала

В.В. Горский^{1,2}, А.Н. Гордеев³, А.А. Дмитриева¹, А.Ф. Колесников³

¹ АО «ВПК «НПО машиностроения», Россия, Реутов МО, 143966, ул. Гагарина, 33

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, 105005, ул. 2-ая Бауманская, д.5, стр.1

³ Институт проблем механики РАН, Россия, Москва, 119526, пр. Вернадского, 101, к.1
gorskknat@yandex.ru, a_gord@mail.ru, a.a.dmitrieva@vpk.npomash.ru, koles@ipmnet.ru

Аннотация

Проведены эксперименты по уносу массы тепловой защиты в окислительных дозвуковых струях ВЧ-плазматрона ВГУ-4 ИПМех РАН и на основе экспериментальных данных определены эффективные физические свойства углеродного материала по отношению к его окислению молекулярным и атомарным кислородом. Все эксперименты проводились в условиях, для которых были определены зависимости коэффициента теплообмена и давления торможения в критической точке модели от мощности установки.

Кинетические константы исследуемого процесса находились из решения обратной задачи по воспроизведению в расчетах суммарной скорости уноса массы материала, соответствующей зафиксированным зависимостям температуры абляции от времени и полученной в результате проведения систематических экспериментальных исследований.

В результате проведения указанных исследований было установлено, что наблюдается удовлетворительное соответствие между расчетно-теоретическими и экспериментальными данными по абляции углеродного материала для тех значений порядка реакции и энергии активации в законе Аррениуса, которые были установлены в прямом физическом эксперименте для молекулярного кислорода. Этот вывод относится как к молекулярному, так и к атомарному кислороду.

Ключевые слова: углерод, абляция, окисление, сублимация, кинетические константы.

1. Введение

Углеродные материалы относятся к числу самых востребованных абляционных теплозащитных покрытий, используемых в ракетно-космической технике. Унос массы этих материалов сопровождается протеканием целого ряда процессов, к числу которых относятся: окисление, сублимация, нитрирование и эрозия. Для качественного проектирования тепловой защиты данного класса необходимы исследования основных закономерностей протекания указанных процессов. Изучение процесса окисления углерода целесообразно проводить при умеренных скоростях абляции материала, не превышающих их значения, соответствующего максимально возможной скорости подвода окислителя к стенке за счет диффузии с внешней границы пограничного слоя. Под термином «стенка» здесь и ниже понимается поверхность материала, обтекаемая газовым потоком.

В указанных условиях протеканием сублимации и нитрирования можно пренебречь [1], а исключить из рассмотрения эрозию углерода можно путем ограничения величины давления торможения газового потока [2].

Изучению абляции углерода в указанных условиях и посвящена данная работа.

Общепринятым является утверждение о том, что процесс окисления углеродного материала является гетерогенным [1]. На базе многочисленных экспериментальных исследований (например, [3, 4]) было установлено, что по мере возрастания температуры стенки в среде молекулярного кислорода до некоторых пор наблюдается линейный характер зависимости логарифма скорости окисления от обратной температуры поверхности материала, обтекаемой окислительным газовым потоком.

Также в рассматриваемых условиях было установлено [4], что скорость окисления углерода пропорциональна квадратному корню из парциального давления молекулярного кислорода на стенке. Для установления такой зависимости была необходима информация о величине указанного давления, которая при проведении экспериментальных исследований такого рода известна только в том случае, если это давление совпадает с его значением в набегающем газовом потоке.

Для этого же, в свою очередь, необходимо:

- чтобы убыль окислителя, связанная с протеканием изучаемого процесса, практически не сказывалась на содержании его на стенке;
- чтобы окислитель, содержащийся в набегающем потоке, не участвовал в других химических реакциях помимо гетерогенной реакции окисления углерода.

Поэтому единственным случаем, для которого в эксперименте достаточно точно известно парциальное давление окислителя на стенке, является использование в качестве окислителя в набегающем потоке молекулярного кислорода при достаточно низкой скорости окисления углерода.

Полученные же при этом экспериментальные данные можно отнести к разряду фундаментальных, т.е. пригодных для установления математического описания этого процесса, включая определение его эффективных кинетических констант.

Такая работа, в свое время, была проведена, вследствие чего было установлено, что массовая скорость окисления плотного углерода в парах молекулярного кислорода описывается степенным законом Аррениуса вида [1]

$$G_{\text{Ок,О}_2} = K_{\text{O}_2} p_{\text{O}_2, \text{w}}^{n_{\text{O}_2}} \exp\left(-\frac{E_{\text{O}_2}}{R_{\text{ун}} T_{\text{w}}}\right), \quad \text{кг}/(\text{м}^2 \text{с}) \quad (1)$$

При этом

$$\lg(K_{\text{O}_2}) \sim 5, \quad n_{\text{O}_2} = 0.5, \quad E_{\text{O}_2}/R_{\text{ун}} \approx 20000 \text{ К} \quad (2)$$

Здесь T – температура, К; p_i – парциальное давление i -го вещества, Па; E – энергия активации, Дж/кмоль; $R_{\text{ун}}$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль · К).

При этом трактовка исследуемого явления, основанная на гипотезе о том, что скорость окисления углерода пропорциональна произведению плотности заселенности стенки хемосорбированным кислородом на вероятность участия его в химической реакции не является физически противоречивой.

Для того, чтобы воспользоваться этим уравнением при достаточно больших скоростях абляции углерода, необходимо добавить к нему балансовые и термодинамические соотношения, необходимые для расчета химического состава газовой смеси на стенке.

Однако существует серьезная причина, препятствующая расчету скорости окисления углерода с использованием уравнения (1), обусловленная тем, что при достаточно больших скоростях абляции материала его окисление проходит при наличии на стенке атомарного кислорода.

Так как приведенная выше физическая трактовка процесса окисления углерода молекулярным кислородом не является физически противоречивой, то также представляется физически обоснованным использование для описания процесса гетерогенного окисления углерода атомарным кислородом уравнения вида

$$G_{Ox,O} = K_w p_{O,w}^n \exp\left(-\frac{E_w}{R_{un} T_w}\right) \quad (3)$$

В свою очередь, для расчета суммарной скорости окисления углерода в первом приближении можно использовать выражение вида

$$G_{Ox} = G_{Ox,O_2} + G_{Ox,O} \quad (4)$$

Тогда, дополнив уравнение (4) необходимыми балансовыми и термодинамическими соотношениями и проведя абляционные эксперименты в окислительной газовой струе, для которой выполнены необходимые калориметрические исследования, можно найти решение обратной задачи по определению кинетических коэффициентов K, n, E , входящих в уравнения (1) и (3).

Такая работа и была проведена применительно к абляционным экспериментам, выполненным в высокоэнтальпийных воздушных струях ВЧ-плазмотрона ВГУ-4 ИПМех РАН.

2. Физико-математическая постановка задачи

Химический состав газовой смеси на стенке будем рассчитывать с использованием [1]:

- допущения о том, что химический состав газовой смеси в пограничном слое ограничен набором веществ $O, O_2, N_2, CO, CO_2, Ar$;
- допущения о том, что в процессе гетерогенного окисления углерода участвуют только атомарный и молекулярный кислород;
- допущения об абсолютной каталитичности поверхности углерода;
- констант равновесия химических реакций, приведенных в работе [5];
- балансов масс химических элементов на стенке;
- аналогии между процессами теплопереноса в пограничном слое;
- линейного приближения для учета эффекта блокировки теплообмена парами материала, вдуваемыми в ламинарный пограничный слой.

Указанные расчетные соотношения записываются в форме

$$\kappa_{eq,O_2}(T_w) = \frac{p_{O,w}^2}{p_{O_2,w}}; \quad \kappa_{eq,CO}(T_w) = \frac{p_{O,w} p_{C,w}}{p_{CO,w}}; \quad \kappa_{eq,CO_2}(T_w) = \frac{p_{O,w}^2 p_{C,w}}{p_{CO_2,w}};$$

$$C_{O,w} + C_{O_2,w} + C_{CO,w} \frac{M_O}{M_{CO}} + 2C_{CO_2,w} \frac{M_O}{M_{CO_2}} = \frac{A_h}{A_h + G_{Ox}} \Theta_{O,out}; \quad C_{N_2,w} = \frac{A_h}{A_h + G_{Ox}} \Theta_{N,out};$$

$$C_{CO,w} \frac{M_C}{M_{CO}} + C_{CO_2,w} \frac{M_C}{M_{CO_2}} = \frac{G_{Ox}}{A_h + G_{Ox}}; \quad A_h = A_{h,im} - \gamma G_{Ox}$$

Здесь C_i, M_i – 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, $kg/(m^2 \cdot c)$; γ – коэффициент вдува.

Как видно, для расчета скорости окисления углерода при заданных значениях кинетических констант и температуры стенки необходимым является наличие информации о давлении в пограничном слое и коэффициенте теплообмена на непроницаемой стенке.

3. Методика определения кинетических констант окисления углерода

Данная методика базируется на использовании результатов систематических экспериментальных исследований конкретной композиции углеродного материала, полученных в высокоэнтальпийной струе аэродинамической установки.

Проведению экспериментальных исследований рассматриваемого типа должны предшествовать калориметрические исследования, направленные на получения данных о коэффициенте теплообмена $A_{h,im,0}$ на непроницаемой поверхности модели исходной формы в окрестности ее критической точки, а также измерения давления p_0 торможения потока газа на модели. В свою очередь, при проведении экспериментальных исследований должна быть получена информация о температуре модели T_w в окрестности ее критической точки в течение всего времени эксперимента, а также суммарное изменение длины образца Δ_{Exp} за время эксперимента, измеренное с помощью микрометра.

Кроме этого, необходимо располагать информацией об элементарном химическом составе газовой струи.

Если суммарная величина 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 (смотри, например, работу [6]).

Пусть для каждого k -го эксперимента из числа N_{Exp} установлены:

- 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 $\Delta_{Exp,k}$;
- табличная зависимость $T_{w,j,k}$, соответствующая временной шкале $\tau_{j,k}$, $j = \overline{1, N_{\tau,k}}$;
- 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.

Здесь $N_{\tau,k}$ – число узловых значений временной координаты.

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

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

Здесь ρ – плотность материала, кг/м³; $G_{Ox,1} = 0$.

Тогда в качестве критерия оптимальности искомого решения задачи будем использовать минимум функционала вида

$$F = \frac{1}{N_{Exp}} \sum_{k=1}^{N_{Exp}} \left| \Delta_{Cal,k} / \Delta_{Exp,k} - 1 \right|$$

В данной работе поиск решения сформулированной оптимизационной задачи ищется с помощью одного из вариантов эвристического метода прямого поиска Хука – Дживса [7].

4. Методика проведения экспериментальных исследований

Эксперименты проводились на 100-киловаттном высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4. Принципиальная схема установки показана на рис. 1. Подробное описание установки приведено в [8].

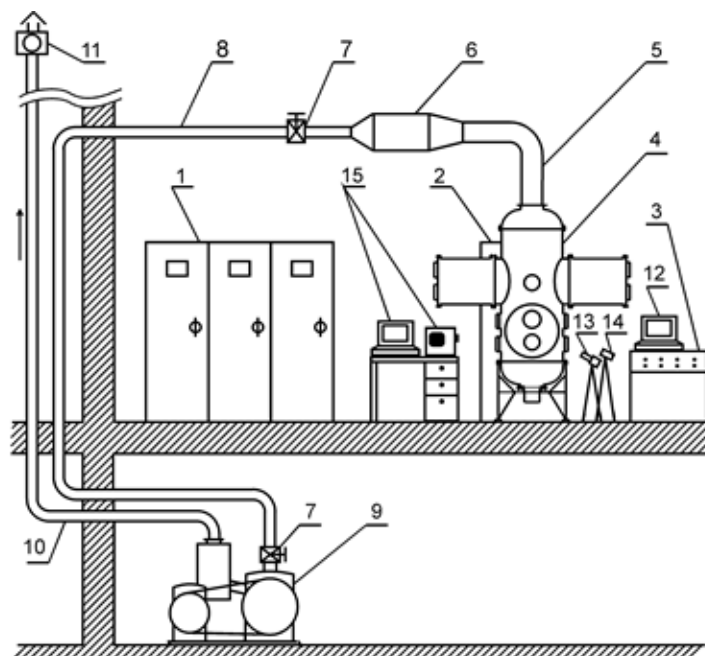


Рис. 1. Принципиальная схема высокочастотного индукционного плазмотрона ВГУ-4: 1 – ВЧ-генератор; 2 – блок согласования плазменной нагрузки с ВЧ-генератором, 3 – пульт управления, 4 – испытательная камера, 5 – водоохлаждаемый вакуумный трубопровод, 6 – теплообменник «плазма–вода», 7 – вакуумные вентили,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

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. Схематический чертёж двух типов образцов и способов их крепления показан на рис. 2.

Образец первого типа, для обозначения которого будем использовать термин «полнотелый», состоял из затупленного по полусфере цилиндра диаметром 30 мм и цилиндрического хвостовика диаметром 13.8 мм и длиной 10 мм.

Последний вставлялся в центральный цилиндрический канал водоохлаждаемой державки диаметром 30 мм, что обеспечивало центровку образца относительно державки.

Образец второго типа, для обозначения которого будем использовать термин «пустотелый», насаживался на цилиндрическую державку диаметром 20 мм со сферическим притуплением. Таким способом обеспечивалось его охлаждение и создавалась возможность получения существенно более низких температур, чем при использовании полнотелого образца.

Для измерения тепловых потоков применялся стационарный водоохлаждаемый калориметр [8], имеющий форму сферически затупленного цилиндра диаметром 30 мм, которая была идентична форме испытываемых образцов, изготовленных из углеродного материала.

Такую же форму имел и энтальпиемер с отбором газа [9–12], который использовался для прямого измерения энтальпии торможения газового потока.

Носок обоих зондов, так же, как и носок образцов, располагался на расстоянии 60 мм от выходного сечения разрядного канала.

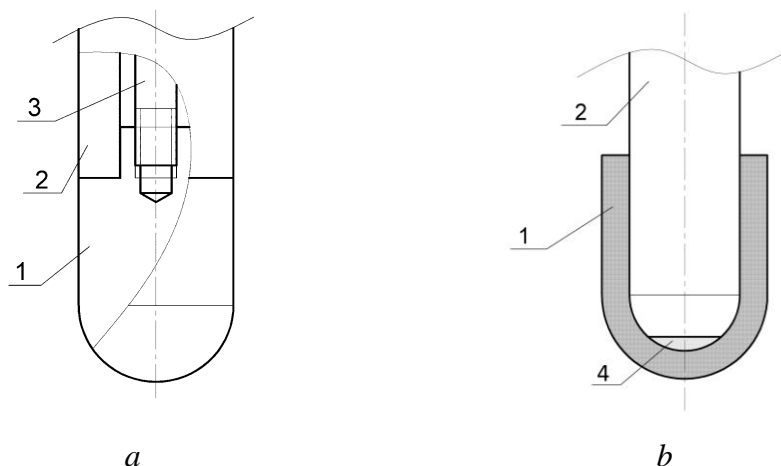


Рис. 2. Формы испытываемых образцов и крепление их на державке. *a* – полнотельный образец; *b* – пустотельный образец; 1 – образец из углеродного материала, 2 – водоохлаждаемая державка, 3 – тяга, 4 – датчик теплового потока, показания которого не использовались

5. Пример решения оптимизационной задачи по определению кинетических коэффициентов гетерогенного окисления углерода

В качестве примера рассмотрим решения данной задачи для испытания плотного углеродного материала в дозвуковой воздушной струе ВЧ-плазматрона ВГУ-4 ИПМех РАН при давлении торможения газового потока на модели, равном 0.01 МПа, и радиусе сферического затушения модели, равном 15 мм.

Выбор данного режима испытаний диктовался наличием для него calorimetric data, приведенных на рис. 3, которые необходимы для расчета коэффициента теплообмена на непроницаемой поверхности модели исходной формы в широком диапазоне изменения мощности стенда.

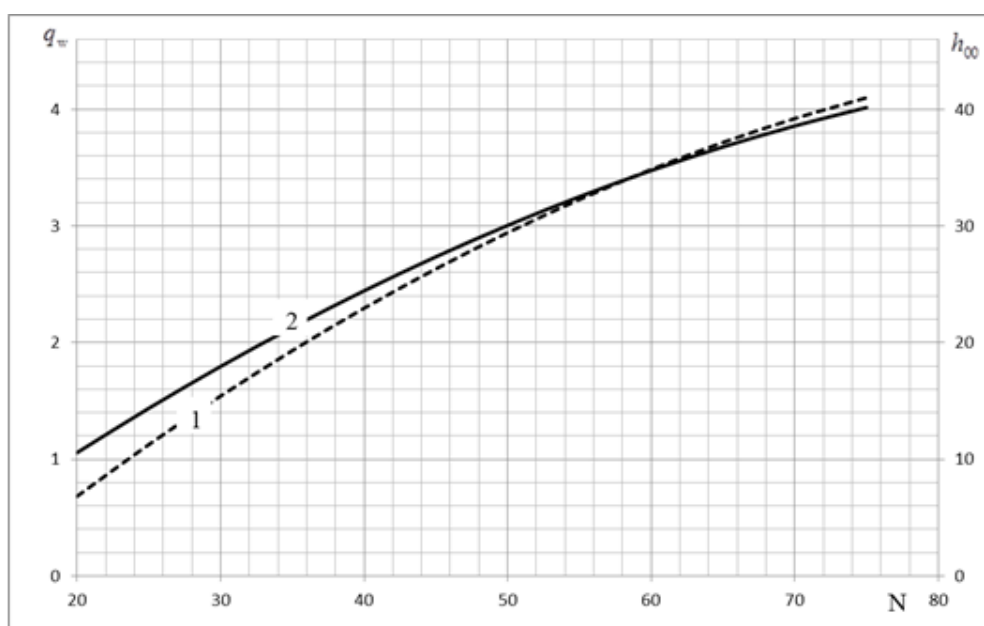


Рис. 3. Калориметрические данные по зависимости удельного теплового потока q_w в окрестности критической точки холодной модели и энтальпии h_{00} торможения газового потока от мощности стенда: 1 – q_w ; 2 – h_{00} ; q_w , МВт/м²; h_{00} , МДж/кг; N , кВт

В свою очередь, величина коэффициента теплообмена $A_{h,im,0}$ рассчитывалась по формуле $A_{h,im,0} = q_w / (h_{00} - h_w)$, в которой для энтальпии h_w воздуха на холодной стенке использовалось ее значение, равное 0.4 МДж/кг.

Расчетно-теоретический анализ результатов экспериментов, на базе которых ниже получены оценки для кинетических констант окисления углерода, включал в себя данные по 16-ти экспериментам, для которых вся необходимая информация приведена в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные по режимам испытаний

№ эксп.	Тип модели	N , кВт	$A_{h,im,0}$, кг/(м ² ·с)	Δ_{Exp} , мм	№ эксп.	Тип модели	N , кВт	$A_{h,im,0}$, кг/(м ² ·с)	Δ_{Exp} , мм
1	полнотельный	20	0.067	0.87	9	пустотельный	20	0.067	0.66
2	полнотельный	24	0.0805	1.59	10	пустотельный	30	0.0878	1.5
3	полнотельный	30	0.0878	2.05	11	пустотельный	35	0.0924	1.39
4	полнотельный	35	0.0924	1.8	12	пустотельный	24	0.0805	1.17
5	полнотельный	20	0.067	0.41	13	пустотельный	35	0.0924	1.84
6	полнотельный	35	0.0924	0.71	14	пустотельный	30	0.0878	1.52
7	полнотельный	30	0.0878	0.59	15	пустотельный	35	0.0824	1.92
8	полнотельный	24	0.0805	0.52	16	пустотельный	30	0.0878	1.68

В свою очередь, данные по измеренной температуре стенки в окрестности ее критической точки модели приведены на рис. 4, на котором цифры над кривыми означают номер эксперимента.

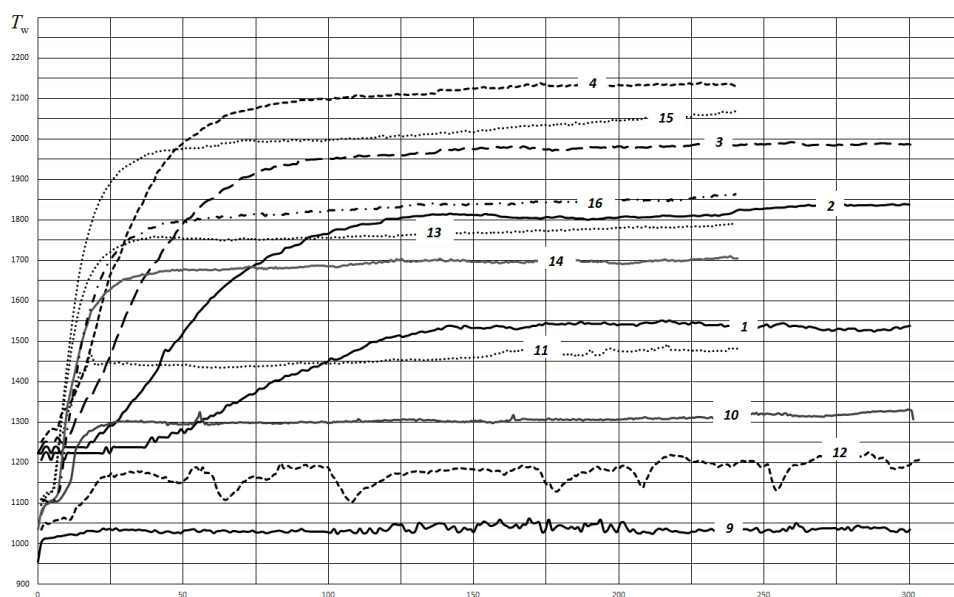


Рис. 4. Зависимость температуры модели в окрестности ее критической точки от временной координаты, зафиксированные в различных экспериментах: T_w , С; τ , с

При проведении анализа представленных экспериментальных данных не возникает необходимости в корректировке коэффициента теплообмена, обусловленной обгаром модели, вследствие незначительной величины последнего по сравнению с радиусом затупления исходной модели. В свою очередь, для коэффициента вдува использовалось его значение, равное 0.65, хорошо себя зарекомендовавшее при сопоставлении численных решений уравнений ламинарного пограничного слоя на аблирующей углеродной стенке с аналогичными решениями, полученными в рамках аналогии между процессами теплообмена [2].

В результате решения оптимизационной задачи по описанному выше алгоритму были определены значения кинетических констант окисления углерода атомарным и молекулярным кислородом, которые лишь незначительно отличались от их значений, указанных в наборе (2).

Качество найденного при этом решения задачи иллюстрируется рис. 5, на котором изображено соответствие между расчетными и экспериментальными значениями обгара моделей для всех 16-ти экспериментов, а цифры над значками означают номер эксперимента.

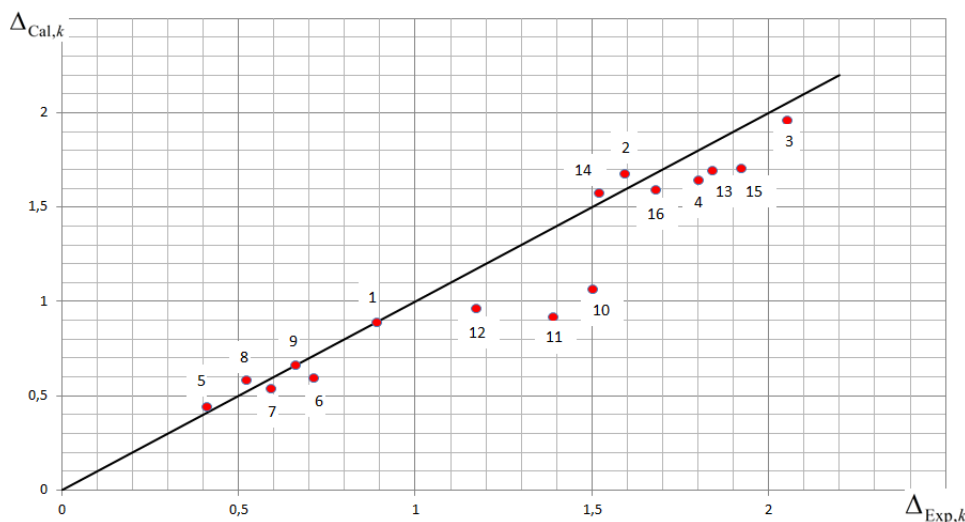


Рис. 5. Зависимость расчетных значений обгара модели от их экспериментального аналога

Более того, проведенный дополнительно анализ позволил установить, что использование в расчетах фиксированных значений энергии активации и порядка реакции, указанных в списке (2), позволяет с удовлетворительной точностью описать весь объем экспериментальных, приведенных:

- в данной работе при относительно низких температурах стенки и давлении в потоке воздуха, равном 0.01 МПа;
- в работах [13, 14] при высоких температурах стенки, соответствующих сублимационному режиму абляции углерода, при давлении в потоке воздуха, равном 0.02, 0.03 и 0.3 МПа.

Соответствующая информация, иллюстрирующая сказанное, приведена на рис. 6.

Это дает определенные основания для того, чтобы:

- трактовать указанные кинетические константы как универсальные характеристики окисления плотного углеродного материала;
- подтвердить обоснованность указанного выше предположения, о том, что гетерогенная химическая реакция окисления углерода происходит всегда с атомарным кислородом, независимо от того, в каком виде окислитель присутствует на стенке.

В то же время, величина предэкспоненциального множителя K_0 , характеризующего степень заселенности стенки окислителем, на сублимационном режиме абляции плотного углеродного материала оказывается примерно на три порядка меньше, чем на низкотемпературном режиме, рассмотренном в данной работе. В свою очередь, на низкотемпературном режиме величина K_0 примерно на порядок превышает величину K_{O_2} .

По всей видимости, полученное соотношение величин предэкспоненциальных множителей является следствием того, что:

- при высоких температурах стенки подавляющая ее часть занята процессом сублимации углерода;

- в той области низких температур стенки, при которых окислитель находится в молекулярном состоянии, большая ее часть занята хемосорбированным молекулярным кислородом.

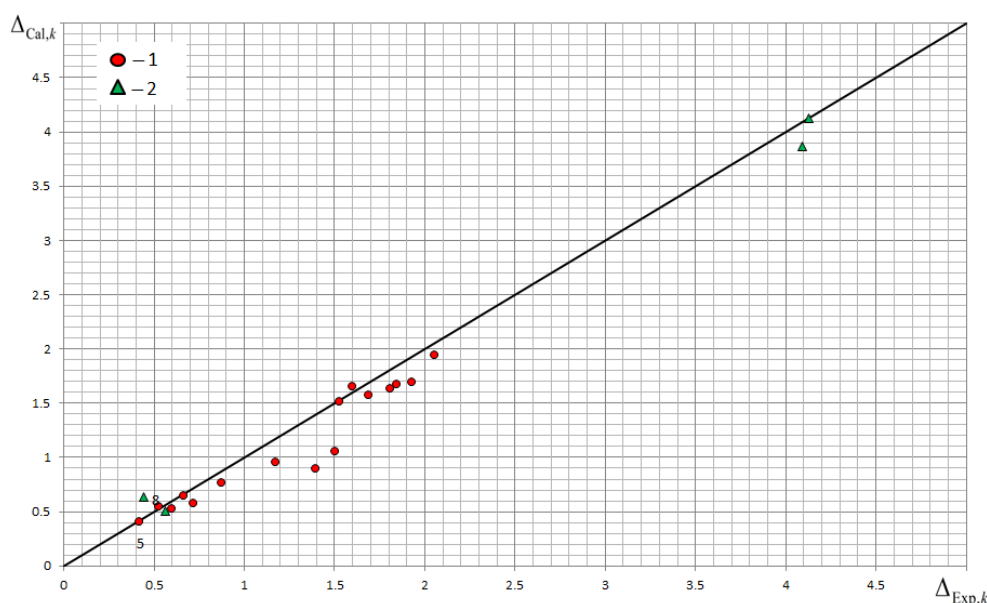


Рис. 6. Обобщенная зависимость расчетных значений обгара модели от их экспериментального аналога, полученных в данной работе и в работах [13, 14]; 1 – результаты, полученные в данной работе, 2 – в работах [13, 14]

Указанное различие в величинах предэкспоненциального множителя K_O на различных режимах абляции углерода вызывает необходимость в формулировке непрерывной зависимости скорости окисления углерода от температуры стенки.

Учитывая то обстоятельство, что в области изменения температуры стенки [2500, 3000] градусов Кельвина кинетические константы рассматриваемой реакции практически не сказываются на величине скорости окисления углерода, сформулированная проблемы может быть просто решена путем использования формулы вида

$$K_O(T_w) = K_{O,a} + (K_{O,b} - K_{O,a}) \xi(T_w); \quad \xi(T_w) = \max\left(0, \min\left(1, \frac{T_w - 2500}{500}\right)\right)$$

Здесь $K_{O,a}$ и $K_{O,b}$ соответствуют значениям кинетической константы K_O при температурах стенки, не превышающих 2500 К и превышающих 3000 К соответственно.

В заключении необходимо обратить внимание на недопустимость применения на практике для расчета скорости окисления углерода гипотезы (используемой, в частности, в работах [15–17]), согласно которой эта скорость равна произведению скорости соударения частиц окислителя со стенкой на вероятность участия этих частиц в гетерогенной химической реакции с углеродом.

Доказывается последнее утверждение путем сопоставления результатов применения этой гипотезы с соответствующими результатами экспериментальных исследований, которые характеризуются известными данными по парциальному давлению молекулярного кислорода на стенке и описываются формулой (1) и кинетическими константами из списка (2).

В указанных условиях скорость соударения частиц окислителя со стенкой действительно описывается формулой Герца – Кнудсена, которая и используется в работах [15–17] в виде

$$G_{Ox} = \frac{P_{O_2,w}}{\sqrt{2\pi R_{un} T_w / M_{O_2}}} \exp\left(-\frac{2000}{T_w}\right) \approx 10^{-3} P_{O_2,w} \exp\left(-\frac{20000}{T_w}\right)$$

Как видно, различие между анализируемыми результатами составляет примерно восемь порядков. Также наблюдается различие в степенях парциального давления кислорода. В этой связи, любые утверждения о том, что в работах [15, 16] установлен закон окисления углерода атомарным кислородом, являются абсолютно необоснованными.

6. Выводы

1. Предложен новый подход к определению кинетических констант окисления углерода, пригодный для произвольных скоростей абляции материала.

2. Впервые получены данные по кинетическим константам окисления углерода в условиях наличия на стенке как атомарного, так и молекулярного кислорода, при умеренных скоростях абляции углерода.

3. Показано, что в первом приближении энергия активации и порядок реакции в степенном законе Аррениуса не зависят ни от вида, в котором окислитель присутствует на стенке, ни от температурного диапазона, на котором протекает процесс окисления углерода.

4. Предложена новая формула для расчета зависимости скорости окисления плотного углеродного материала от температуры стенки, обеспечивающая непрерывности этой функциональной зависимости.

5. Обоснована недопустимость использования на практике для расчета скорости окисления углерода гипотезы, однозначно связывающей ее со скоростью соударения частиц окислителя со стенкой.

Литература

1. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. - 391с.
2. Горский В.В. Теоретические основы расчета абляционной тепловой защиты. – М.: Научный мир, 2015. – 688с.
3. Мур Дж.А., Злотник М. Горение углерода в потоке воздуха //Ракетная техника. 1961. Е. 1, № 10. С. 35–45.
4. Блайхолдер Дж., Эйринг Г. Кинетика окисления графита. – В сборнике /Реакции углерода с газами. Под редакцией Е.С. Головиной. – М.: Изд. Иностранной литературы, 1963. С. 182–201.
5. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание в 4-х томах. /Ред. Коллегия В.П. Глушко, Л.В. Гурвич, Г.А. Бергман и др. – М.: Наука, 1979. Т. II, Кн. 2. – 341 с.
6. 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. Том 88, № 1. С. 161–164.
7. Аоки М. Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования. – М.: Наука, 1977. – 343с.
8. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Высокочастотные индукционные плазмотроны серии ВГУ. - в сб. /Актуальные проблемы механики: Физико-химическая механика жидкостей и газов. Москва: Наука, 2010. С. 151-177.
9. 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.
10. Kolesnikov A.F., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A. and Yakushin M.I. Study of Quartz Surface Catalycity in Dissociated Carbon Dioxide Subsonic Flows // Journal of Spacecraft and Rockets. 2000. V. 37, No. 5. Pp. 573–579.
11. Дорошенко В.М., Мысова В.М., Рулёв Ю.К., Якушин М.И. Измерение энтальпии в дозвуковых высокотемпературных струях азота и воздуха на индукционном плазмотроне. //ИФЖ. 1987. Т. 53, №3. С. 492–493.

12. 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. Moscow. 2007.
13. 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.
14. Горский В.В., Дмитриева А.А. Определение кинетических констант гетерогенного окисления углерода на сублимационном режиме его абляции по результатам суммарных абляционных экспериментов //Вопросы оборонной техники. 2017, выпуск 15.
15. Rosner D.E., Allendorf H.D. Comparative Studies of the Attack of Pyrolytic and Isotopic Graphite by Atomic and Molecular Oxygen at High Temperatures // AIAA Journal. 1965. V. 16. P. 650.
16. Park C. Effects of Atomic Oxygen Ablation // AIAA Journal. 1976. V. 14. № 11. P. 1640.
17. Власов В.И., Залогин Г.Н. Численное моделирование термохимического разрушения углеродо-содержащих материалов тепловой защиты // Космонавтика и ракетостроение, 2015, № 2, С. 84.

Статья поступила в редакцию 21 марта 2018 г.