Наука и Образование МГТУ им. Н.Э. Баумана

Сетевое научное издание ISSN 1994-0408 Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 126–140.

DOI: 10.7463/1015.0814845

Представлена в редакцию: 09.09.2015 Исправлена: 24.09.2015

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 533.16

Определение физических свойств углеродных материалов по результатам абляционных экспериментов, проведенных в струях газодинамических установок

Горский В. В.^{1,2}, Оленичева А. А.^{1,2}, Реш В. Г.^{1,*}

resch883@mail.ru

¹АО «ВПК «НПО Машиностроения», Реутов, Россия ²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В настоящее время в качестве тепловой защиты высокотемпературных фрагментов конструкции гиперзвуковых летательных аппаратов широко используются углерод-углеродные композиционные материалы. Вопросам связанным с определением абляционных свойств теплозащитных материалов этого типа посвящена данная статья. Проведено сопоставление расчетно-теоретических и экспериментальных данных, выполненное применительно к условиям испытаний современного углеродного материала в струе электродуговой установки и в струе продуктов сгорания жидкостного ракетного двигателя. Впервые получены данные по кинетике окисления углерода атомарным кислородом на сублимационном режиме абляции материала. Сформулирован новый подход к обработке абляционных экспериментов в струе продуктов сгорания ЖРД, использование которого позволяет переносить результаты этих стендовых испытаний на натурные условия функционирования тепловой защиты. Впервые установлен закон эрозии углерода при высоких давлениях.

Ключевые слова: углеродный материал, абляционный эксперимент, термохимическое разрушение

Введение

Моделирование натурных условий функционирования абляционной тепловой защиты в процессе ее стендовой отработки обычно не представляется возможным. Вследствие этого качественный перенос результатов стендовых абляционных экспериментов на натурные условия функционирования любого типа тепловой защиты (в том числе и изготовленной из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ)) возможен только с использованием расчетно-теоретической модели ее абляции, которая апробирована на широком круге экспериментальных данных.

В работе [1] сформулированы основные элементы современного подхода к формулировке расчетно-теоретической модели абляции УУКМ, основными принципиальными элементами которой являются: отказ от использования допущения о том, что скорость гетерогенного окисления углерода однозначно определяется максимально возможной скоростью диффузии кислорода в области достаточно высоких температур «стенки» [2, 3]; замена указанного допущения использованием кинетического записанного В форме уравнения окисления углерода, уравнения Аррениуса; использование кинетики окисления углерода в струях продуктов сгорания ракетных двигателей, которая записана через концентрацию свободного кислорода на стенке; использование новой формульной записи для зависимости скорости эрозии углерода от местного давления газа на стенке.

Математическое описание всех основных процессов, включенных в рассматриваемую постановку задачи об абляции УУКМ, содержит целый ряд «свободных» параметров, значение которых может быть установлено только на базе сопоставления расчетно-теоретических и экспериментальных данных по суммарным абляционным характеристикам этих материалов.

В данной статье приводятся результаты такого сопоставления, выполненного применительно к условиям стендовой отработки УУКМ в струях электродуговой установки (ЭДУ) и в струе продуктов сгорания кислородно-водородного жидкостного двигателя (ЖРД).

1. Сопоставление расчетно-теоретических данных и результатов абляционных экспериментов в струях ЭДУ для углеродных материалов

Объектом настоящего анализа являлись результаты 6-ти нестационарных абляционных экспериментов, выполненных в высокоэнтальпийной струе ЭДУ на маломасштабных цилиндрических образцах, затупленных по сфере, при давлении торможения порядка 3-х атмосфер.

В процессе проведения анализируемой серии экспериментов данный стенд был оснащен измерительным зондом, в состав которого входили:

- проточный калориметр;
- датчик давления торможения газового потока;
- датчик давления газового потока на боковой поверхности зонда.

Это позволило достаточно качественно провести диагностику параметров воздушной струи, натекающей на зонд.

Форма рабочей части измерительного зонда совпадала с исходной формой испытываемых образцов. Для определения линейной скорости перемещения критической точки образца при этом использовалась лишь относительно небольшая совокупность малых интервалов изменения временной координаты, для которых можно было с достаточной точностью установить как эту линейную скорость, так и соответствующую ей температуру стенки.

Сводная информация по линейной скорости разрушения образца и соответствующей ей температуре стенки по всей серии проведенных экспериментов помещена в табл. 1 [4]. Здесь же приводятся данные по массовой скорости абляции материала и коэффициенту теплообмена, полученные с учетом изменения формы образца в процессе эксперимента.

N	$R_{ m Sph}$	A _{h,n} , кг/(м²с)	V _{Аbl} , мм/с	$G_{\scriptscriptstyle m Abl}$	Т _w , ⁰ К
1	2,0100	1,7747	0,3485	0,3868	3860,0
2	1,0000	2,2050	0,1719	0,1536	2870,0
	1,0000	2,2050	0,1719	0,1536	3220,0
	1,0000	2,2050	0,1719	0,1536	3402,8
3	1,2648	2,0506	0,2751	0,2643	3800,0
	1,6221	1,8108	0,2938	0,3196	3905,0
	1,9993	1,6310	0,3314	0,4003	3915,0
4	1,0000	2,1352	0,1719	0,1586	2870,0
	1,0000	2,1352	0,1719	0,1586	3220,0
	1,0000	2,1352	0,1719	0,1586	3402,8
5	1,1521	2,0917	0,1719	0,1619	3438,5
	1,3618	1.8886	0.2358	0.2460	3666.0
	1,6112	1.8558	0.2653	0.2816	3686.5
6	1,0000	2.2568	0.1719	0.1501	3298.9
	1,0000	2.2568	0.2358	0.2058	3559.3
	1,0000	2.2568	0.2579	0.2251	3575.0

Таблица 1. Абляционные характеристики УМ

Здесь:

 $A_{\mathrm{h,n}}$ – коэффициент теплообмена на непроницаемой поверхности образца текущей формы;

 $V_{\rm Abl}, T_{\rm w}$ – линейная скорость перемещения критической точки образца и температура в этой точке;

 G_{Abl} – массовая скорость абляции образца, измеренная в долях от $A_{h,n}$;

 $R_{\rm Sph}$ – эффективный радиус сферического затупления образца в долях от его исходного значения.

Приведенные здесь экспериментальные данные позволяют решить обратную задачу по определению кинетических констант гетерогенного окисления углерода атомарным кислородом с использованием физико-математической модели термохимического разрушения углеродного материала в окислительном газовом потоке [1, 5].

При решении данной задачи принималось:

 что в процессе окисления углерода участвуют только атомарный и молекулярный кислород, а первичным продуктом этой химической реакции является оксид углерода; • что процесс окисления углерода каждым окислительным веществом описывается уравнением Аррениуса первого порядка вида

$$G_{\rm Ox} = \frac{\rho_{\rm w}}{A_{A_{h,n}}} \left(Z_{\rm O} \omega_{\rm O} + 2Z_{\rm O2} \omega_{\rm O2} \right) M_{\rm C}; \ \omega_i = K_{{\rm w},i} \exp\left(-\frac{E_{{\rm w},i}}{R_{\rm un}T_{\rm w}}\right); \ \rho_{\rm w} = \frac{p_{\rm e} M_{\rm w}}{R_{\rm un}T_{\rm w}};$$

• что кинетические константы окисления углерода молекулярным кислородом, входящие в уравнение Аррениуса, известны и равны:

$$K_{\rm w,O2} = 4,5 \cdot 10^{10}$$
 м/с; $E_{\rm w,O2} = 1,72 \cdot 10^8$ Дж/кмоль;

- что число чисто углеродных соединений в пограничном слое ограничено набором С, С2, С3;
- что процесс сублимации углерода рассматривается в неравновесной постановке [3] вида

$$G_{\rm Sub} = \sum_{i=1}^{3} \frac{\zeta_i}{A_{A_{h,n}}} \frac{p_{{\rm C}i,\oplus}(T_{\rm w}) - p_{{\rm C}i,\rm w}}}{\sqrt{2\pi R_{\rm un} T_{\rm w}} / M_{{\rm C}i}};$$

- что для коэффициентов ζ_C, ζ_{C2}, ζ_{C3} аккомодации стенки по отношению к молекулам C, C2, C3 используются их значения из работы [3], равные соответственно 0,3, 0,5 и 0,1;
- что эрозией углерода в условиях рассматриваемой серии экспериментов можно пренебречь.

Здесь:

*G*_{Ox}, *G*_{Sub} – массовые скорости гетерогенного окисления и сублимации углерода в долях от коэффициента *A*_{*h*,*n*} теплообмена на непроницаемой стенке;

 Z_i, M_w – отношение массовой концентрации *i*-того вещества к его мольной массе M_i и мольная масса газовой смеси на стенке;

 $K_{w,i}, E_{w,i}$ – кинетические константы гетерогенного окисления углерода *i*-тым веществом; R_{un} – универсальная газовая постоянная;

p_e – давление на внешней границе пограничного слоя;

 $p_{i,w}, p_{i,\oplus}$ – парциальное давление *i* - того вещества на стенке и давление его насыщенного пара.

 $\rho_{\rm w}$ – плотность газовой смеси на «стенке», кг/м³;

В этой связи необходимо обратить внимание на то:

 что использование указанных данных по кинетическим константам молекулярного кислорода не сказывается на решении рассматриваемой задачи, так как окисление углерода атомарным и молекулярным кислородом происходит в различных температурных интервалах: для молекулярного кислорода – это область температур 800-2300 К, а для атомарного кислорода – это область температур порядка 2500-5000 К;

- что использование указанных данных по кинетическим константам молекулярного кислорода обеспечивает выход процесса окисления углерода на так называемую вторую диффузионную полку, на которой единственным устойчивым углеродосодержащим веществом является оксид углерода, при общепринятых в литературе [5] температурах порядка 2300 К;
- что обоснованность принятого допущения о пренебрежении эрозией углерода основана на том обстоятельстве, что при температурах стенки, меньших примерно 3600 К, массовая скорость абляции материала, измеренная в долях от коэффициента теплообмена на непроницаемой «стенке», практически не отличается от известного теоретического значения этой скорости, равного примерно 0,156 в отсутствии эрозии углерода.

Решение данной обратной задачи заключается в отыскании кинетических констант окисления углерода атомарным кислородом, обеспечивающих минимальное среднеквадратическое рассогласование между экспериментальными и расчетнотеоретическими значениями скорости абляции углерода для всех 16-ти вариантов исходных данных, помещенных в табл. 1.

Решение указанной задачи ищется с использованием одного из вариантов оптимизационного метода Хука-Дживса [6], применение которого показало отсутствие единственности решения этой задачи в связи с узким диапазоном изменения температуры стенки на сублимационном режиме абляции углерода, реализованном на ЭДУ ТТ-1 ФГУП ЦНИИмаш. Вследствие этого, решение, полученное в результате проведенного анализа экспериментальных данных по абляции углерода на сублимационном режиме его разрушения, может быть представлено только в форме функциональной зависимости

$$K_{\rm w,O} = K_{\rm w,O} \left(E_{\rm w,O} \right). \tag{1}$$

В случае использования аналогии между процессами тепломассопереноса в пограничном слое на аблирующей углеродной стенке для зависимости (1) на области ее определения [150, 200] МДж/кмоль была получена формула вида:

$$\lg(K_{w,0}) = 0.0121 \cdot E_{w,0} + 6.6597.$$
⁽²⁾

На рис. 1 приводятся результаты сопоставления экспериментальных данных по зависимости суммарной массовой скорости G_{Abl} термохимического разрушения исследованной композиции УМ с результатами решения указанной оптимизационной задачи. Здесь G_{Abl} измеряется в долях от коэффициента теплообмена на непроницаемой поверхности образца. При этом приведенные расчетные кривые соответствуют использованию:

• трех различных значений энергии активации $E_{w,0}$;

 фиксированных значений давления торможения газового потока и коэффициента теплообмена на непроницаемой стенке, равные соответственно 0,3 МПа и 1,8 кг/(м²с).

В свою очередь, результаты расчетов, нанесенные на этот график зачерненными значками, соответствуют значению энергии активации $E_{w,0}$, равному 172 МДж/кмоль.





 $E_{\rm w,O}$, МДж/кмоль; $T_{\rm w}$, ⁰К

2. Сопоставление расчетно-теоретических данных и результата абляционного эксперимента тепловой защиты в струе продуктов сгорания ЖРД для УУКМ

В газодинамических стендах, предназначенных для проведения абляционных экспериментов тепловой защиты в струях продуктов сгорания ЖРД, обычно используются промышленные двигательные установки, в которых, преследуя цель повышения давления торможения струи:

- уменьшается размер сверхзвуковой части соплового тракта (обычно полученное при этом сопло двигательной установки мало чем отличается от звукового сопла);
- испытываемая модель, изготовленная из исследуемого теплозащитного материала, устанавливается на минимально возможном удалении от среза сопла, при котором

сохраняется устойчивый режим истечения продуктов сгорания двигателя в затопленное пространство.

Принципиальная схема проведения абляционного эксперимента в струе продуктов сгорания ЖРД, результаты которого анализируются ниже, приводится на рис. 2.





В качестве горючего на данном стенде используется газообразный водород, а в качестве окислителя – жидкий кислород. Указанные компоненты топлива через форсунки подаются в камеру сгорания, где и происходит их химическое взаимодействие с образованием водяного пара. Через периферийные форсунки в камеру сгорания подается только горючее, используемое для охлаждения стенок сопла, а в ядре струи обычно используется соотношение $k_{\rm Jet}$ компонент топлива (окислителя к горючему), не превышающего своего стехиометрического значения, равного 8, с целью предохранения стенок сопла от прогара.

В процессе проведения эксперимента в струе продуктов сгорания кислородноводородного жидкостного двигателя, результаты которого анализируются ниже, выдаются все исходные данные по течению продуктов сгорания в сопловом тракте двигателя, представленные на рис. 3, 4.



Рис. 3. Зависимость параметров газа в сопловом тракте от временной координаты в процессе проведения эксперимента: $1 - p_k$; $2 - p_c$; $3 - T_k$; $4 - T_c$; p, МПа; T, ⁰K; τ ,

Здесь: p_k - давление газа в камере сгорания, МПа; p_c - давление газа на срезе сопла, МПа; T_k - температура газа в камере сгорания, К; T_c - температура газа на срезе сопла, К; τ - время, с.





Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

На начальной стадии проведения эксперимента наблюдается существенное изменение всех параметров течения газа по сопловому тракту, что, естественно, препятствует проведению корректного анализа экспериментальных данных. В то же время на основном временном отрезке проведения эксперимента режим течения газа по сопловому тракту крайне незначительно отличается от стационарного. Это открывает возможность превращения данного вида испытаний в инструмент для качественного определения физических свойств материала путем использования широко распространенного в аэродинамическом эксперименте способа предохранения модели от воздействия нестационарного газового потока, основанного на применении вспомогательных колпачков, изготовленных из легко уносимого материала (типа фторопласта).

К сожалению, при проведении анализируемых ниже экспериментов указанных мер принято не было, что, безусловно, сказалось на качестве проведенного расчетнотеоретического анализа экспериментальных данных.

Сугубо нестационарный характер изменения во времени всех газодинамических характеристик в камере сгорания двигателя на начальной фазе проведения абляционного эксперимента вызывает серьезные проблемы в сопоставлении расчетно-теоретических и экспериментальных данных по развитию обгарной формы модели во времени. Вследствие этого, ограничились проведением указанного сопоставления на фиксированном моменте времени, который соответствовал длительности обтекания модели газовым потоком на стационарном режиме работы газогенератора в течение 8-ми секунд.

Анализ абляционных экспериментов, выполненных для углеродного материала в высоконапорных окислительных струях продуктов сгорания ЖРД, сопряжен с необходимостью определения: кинетических констант окисления конденсированного углерода окислительными компонентами газового потока; основных закономерностей протекания процесса эрозии углерода; эффективных шероховатостей «стенки» по отношению к месторасположению переходной области на поверхности модели и к усилению конвективного теплообмена.

В рамках используемой при поведении настоящих исследований «полной термохимической модели» уноса массы материалов рассматриваемого класса принимается, что скорость его разрушения за счет гетерогенного окисления углерода в общем случае представляет аддитивную сумму скоростей химических реакций, в которых участвуют различные окислительные компоненты, присутствующие на «стенке».

Скорость гетерогенного окисления углерода записывалась в виде:

$$G_{\rm Ox} = \frac{\rho_{\rm w}}{A_{h,n}} \left(2Z_{\rm O2} + Z_{\rm O} \right) K_{\rm w} \exp\left(-\frac{1,72 \cdot 10^8}{R_{\rm un} T_{\rm w}} \right) M_C \,. \tag{3}$$

В рамках предлагаемой методики принимается, что

• интенсивность процесса «эрозии» углерода зависит только от давления на «стенке»; • задается предельная величина *p*_{Lim} этого давления, вплоть до которой «эрозией» углерода можно пренебречь;

Если первые два из этих положений не вызывают возражений, то последнее из них представляется спорным, так как «эрозия» углерода представляет собой один из трех основных элементов механизма его уноса массы наряду с окислением и сублимацией. Все эти три составляющих суммарного процесса абляции, несомненно, взаимно связаны между собой, а поиск этих связей представляет значительный интерес. Однако нам представляется, что изучая процесс «эрозии» на базе ограниченной выборки экспериментальных данных, следует ограничиться изучением закономерностей протекания этого процесса как такового.

С учетом сказанного предложена следующая функциональная зависимость интенсивности «эрозионного» уноса массы углерода от давления на «стенке»

$$G_{\rm Er} = \frac{K_{\rm Er}}{A_{\rm h,n}} \left\{ \exp\left[\max^{n_{\rm Er}} \left(0, \frac{p_{\rm w}}{p_{\rm Lim}} \right) - 1 \right] - 1 \right\}.$$
(4)

Здесь:

*G*_{Er} – скорость «эрозионного» уноса массы углерода, измеренная в долях от коэффициента теплообмена на непроницаемой «стенке»;

 $K_{\rm Er}$ – предэкспоненциальный множитель, кг/(м²c);

*n*_{Er} – показатель степени.

Известно (см., например, работы [7, 8]), что при больших числах Рейнольдса и турбулентного режима течения газа в пограничном слое, характерных для рассматриваемой проблемы, шероховатость «стенки» оказывает существенное влияние на интенсивность конвективного теплообмена на поверхности затупления тела. Для учета этого фактора вводятся некие эффективные размеры шероховатости $b_{\text{Rou, Tr}}$, $b_{\text{Rou, L}}$ и $b_{\text{Rou, T}}$, используемые соответственно для определения:

- месторасположения «переходной области»;
- степени усиления теплообмена при ламинарном режиме течения газа в пограничном слое;
- степени усиления теплообмена при турбулентном режиме течения газа в пограничном слое.

При этом размер шероховатости «стенки», влияющий на переход режима течения газа в пограничном слое, всегда превышает его аналоги, определяющие степень усиления теплообмена при различных режимах течения газа в этом слое [8].

На первом этапе, было проведено исследование, направленное на установление влияния, оказываемого на формообразование испытанной модели основными элементами механизма уноса массы тепловой защиты.

К числу элементов механизма уноса массы УУКМ, которые были исследованы, относятся:

- кинетические константы гетерогенного окисления углерода компонентами набегающего на модель газового потока;
- зависимость скорости эрозии углерода от силового воздействия на материал со стороны набегающего на модель газового потока;
- размер шероховатости «стенки» по отношению к местоположению «переходной области» на поверхности модели и к усилению интенсивности конвективного теплообмена.

В результате проведенного расчетно-теоретического анализа экспериментальных данных было установлено:

- что при фиксированных значения шероховатости стенки удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных по обгарной форме испытанной модели, может быть получено только при одном сочетании закона эрозии углерода и кинетики его гетерогенного окисления;
- что шероховатость «стенки» по отношению к расположению переходной зоны практически не сказывается на обгарной форме модели;
- что величина шероховатости «стенки» по отношению к усилению конвективного теплообмена сказывается только на кинетике гетерогенного окисления углерода и не сказывается на законе «эрозии» углерода.

Таким образом, удалось установить закон «эрозии» углерода, в рамках которого обеспечивается удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных данных по обгарной форме модели, изготовленной из УМ. Качество этого описания иллюстрируется рис. 7.



Рис. 5. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по обгарной форме модели: 1 — исходная форма; 2 – экспериментальные данные; 3 — расчетные данные

Расчётные данные, представленные на рис. 5, соответствуют следующим исходным данным: $p_{\text{Lim}} = 5 \text{ M}\Pi a$; $K_{\text{Er}} = 5,5 \text{ кг/(m}^2 c)$; $n_{\text{Er}} = 0,5$.

При этом:

- расчет прогрева и обгара модели проводится в нестационарной постановке;
- набегающий на модель газовый поток принимался плоскопараллельным и однородным.

Выводы

В результате проведённого сопоставления расчетно-теоретических данных и экспериментальных исследований:

1. Сформулирован новый подход к обработке абляционных экспериментов в струе продуктов сгорания ЖРД, использование которого позволяет: превратить эти эксперименты для углеродных материалов из сравнительных испытаний в испытания по определению абляционных свойств тепловой защиты; переносить результаты этих стендовых испытаний на натурные условия функционирования тепловой защиты.

2. Впервые установлены кинетика окисления углерода атомарным кислородом и закон эрозии углерода.

Список литературы

- Горский В.В., Полежаев Ю.В. Горение графита в высокотемпературных окислительных газовых потоках // Законы горения / под ред. Ю.В. Полежаева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2006. С. 303-324.
- 2. Скала С.М., Гильберт Л.М. Унос массы графита при гиперзвуковых скоростях // Ракетная техника и космонавтика [русск. перевод журнала AIAA Journal]. 1965. Т. 3, № 9. С. 87-100.
- 3. Анфимов Н.А. Горение графита в потоке воздуха при высоких температурах // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. Механика и машиностроение. 1965. № 5. С. 3-11.
- Горский В.В., Золотарев С.Л., Оленичева А.А. Расчётно-экспериментальные исследования уноса массы углеродного материала на сублимационном режиме его термохимического разрушения // Инженерно-физический журнал. 2015. Т. 88, № 1. С. 161-164.
- 5. Горский В.В., Забарко Д.А., Оленичева А.А. Исследование процесса уноса массы углеродного материала в рамках полной термохимической модели его разрушения для случая равновесного протекания химических реакций в пограничном слое // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 2. С. 307-312.
- 6. Аоки М. Введение в методы оптимизации. Основы и приложения нелинейного программирования: пер. с англ. М.: Наука, 1977. 345 с.

Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана

- 7. Землянский Б.А., Лунев В.В., Власов В.И. и др. Конвективный теплообмен изделий РКТ. Руководство для конструкторов / под ред. Б.А. Землянского. Королев: ФГУП ЦНИИмаш, 2010. 397 с.
- 8. Горский В.В., Носатенко П.Я. Математическое моделирование процессов тепло и массообмена при аэротермохимическом разрушении композиционных теплозащитных материалов на кремнеземной основе. М.: Научный мир, 2008. 255 с.

Determination of Physical Properties of Carbon Materials by Results of Ablative Experiments Con-ducted in the Jets of Gas Dynamic Units

Science & Education

of the Bauman MSTU

Electronic journal

ISSN 1994-0408

V.V. Gorsky^{1,2}, A.A. Olenicheva^{1,2}, V.G. Resh^{1,*} Science and Education of the Bauman MSTU, 2015, no. 10, pp. 126–140.

DOI: 10.7463/1015.0814845

Received: Revised: 09.09.2015 24.09.2015

resch883@mail.ru

© Bauman Moscow State Technical Unversity

¹SC MIC NPO Mashinostroyenia, Reutov, Russia ²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: carbon material, ablation experiment, thermochemical destruction

The process of hypersonic vehicles' movement in the dense layers of the atmosphere is accompanied by the considerable combustion of heat shield, which effects on the aerodynamic, mass-inertial and centering characteristics of the product.

For correct calculation of model's movement parameters it is necessary:

- Using the theoretical and computation methods for determining ablative characteristics of heat-protective materials;
- Taking into account all the basic physical and chemical processes, involved in their ablation, using the above mentioned methods;
- Testing these techniques in the wide range of experimental data.

This physic-mathematical model of carbon materials (CM) aerothermochemical destruction is based on using the following:

- Arrhenius equations to calculate carbon kinetic oxidation;
- Langmuir-Knudsen formula to calculate the velocity of non-equilibrium carbon's sublimation;
- Carbon erosion law represented as a unique dependence of this process velocity on the gas pressure on the wall.

Mathematical description of all major processes included in this formulation of the problem, contains a number of "free" parameters that can be determined only on the basis of comparison of theoretical and experimental data according to total ablation characteristics of these materials.

This comparison was performed in the article applicable to the tests conditions of modern CM in the stream of electric arc plant and in combustion products of liquid-propellant rocket engines.

As the result, the data of kinetic of carbon oxidation by atomic oxygen at sublimation mode of material ablation were obtained for the first time. Carbon erosion law under high pressure was established for the first time.

The new approach to processing of ablation experiments is enunciated. Using this approach allows to turn this experiments for CM from comparative tests into the tests to determine ablation properties of thermal protection. Moreover, it enables us also to use the results of these stand tests in full-scale conditions of thermal protection functioning.

References

- 1. Gorskii V.V., Polezhaev Yu.V. Graphite burning in high-temperatured oxidizing gas streams. In book: *Zakony goreniya* [The laws of burning]. Moscow, Energomash Publ., 2006, pp. 303-324. (in Russian).
- 2. Scala S.M., Gilbert L.M. Sublimation of graphite at hypersonic speeds. *AIAA Journal*, 1965, vol. 3, no. 9, pp. 87-100.
- 3. Anfimov N.A. Graphite burning in air stream at high temperatures. *Izvestiya Akademii nauk* SSSR. Otdelenie tekhnicheskikh nauk. Mekhanika i mashinostroenie = Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Department of Technical Sciences. Mechanics and Mechanical Engineering, 1965, no. 5, pp. 3-11. (in Russian).
- 4. Gorskii V.V., Zolotarev S.L., Olenicheva A.A. Computational and Experimental Investigations Into the Mass Loss of a Carbon Material in the Sublimation Regime of its Thermochemical Destruction. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 161-164. (English version of journal: *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, vol. 88, iss. 1, pp. 163-167. DOI: <u>10.1007/s10891-015-1178-6</u>).
- 5. Gorsky V.V., Zabarko D.A., Olenicheva A.A. Investigation of the mass loss of a carbon material within the framework of a complete thermochemical model of its destruction in the case of equilibrium chemical reactions in the boundary layer. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2012, vol. 50, no. 2, pp. 307-312. (English version of journal: *High Temperature*, 2012, vol. 50, iss. 2, pp. 286-291. DOI: 10.1134/S0018151X12020083).
- Aoki M. Introduction to Optimization Techniques. Fundamentals and Applications of Nonlinear Programming. New York, Macmillan, 1971. (Russ. ed. Aoki M. Vvedenie v metody optimizatsii. Osnovy i prilozheniya nelineinogo programmirovaniya. Moscow, Nauka Publ., 1977. 345 p.).
- Zemlyanskii B.A., Lunev V.V., Vlasov V.I., et al. *Konvektivnyi teploobmen izdelii RKT*. *Rukovodstvo dlya konstruktorov* [Convective heat transfer of rocket and space engineering vehicles. Design guide]. Korolev, TSNIIMASH Publ., 2010. 397 p. (in Russian).
- 8. Gorskii V.V., Nosatenko P.Ya. Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplo i massoobmena pri aerotermokhimicheskom razrushenii kompozitsionnykh teplozashchitnykh materialov na kremnezemnoi osnove [Mathematical simulation of heat and mass transfer processes at aerothermochemical destruction of the composite thermal protection material on siliceous basis]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2008. 255 p. (in Russian).