

УДК 533.6.011.5:532.526:541.2

© 2002 г. Н.Е. АФОНИНА, В.Г. ГРОМОВ, В.Л. КОВАЛЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ ГЕТЕРОГЕННОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ К КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ДИССОЦИИРОВАННОМ УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ

Разработана кинетическая модель гетерогенной рекомбинации в диссоциированной смеси углекислого газа на поверхности высокотемпературных теплозащитных материалов, учитывающая неравновесные реакции физической и химической адсорбции – десорбции атомов кислорода и их рекомбинацию в реакциях Или – Ридела и Ленгмюра – Хиншельвуда. Из сопоставления измеренных на плазматроне ВГУ-4 ИПМ РАН и рассчитанных для тех же условий величин тепловых потоков в диссоциированном углекислом газе, а также имеющих литературных данных выбраны параметры модели катализа для стекловидного покрытия плиточной теплозащиты на основе системы $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--SiB}_4$. В диапазоне температуры поверхности 300–2000 К проведен анализ влияния процессов гетерогенной рекомбинации по механизму Ленгмюра – Хиншельвуда, процессов с участием атомов углерода, а также с участием физически адсорбированных атомов кислорода на величины тепловых потоков к стекловидному покрытию.

1. При полете тел в атмосферах Земли и Марса с гиперзвуковой скоростью неравновесные процессы в газовой фазе и на поверхности оказывают большое влияние на тепловые потоки к поверхности тел. При этом, если различие в величинах тепловых потоков для различных моделей гомогенных процессов достигает 25%, их величины, полученные при различных предположениях о каталитических свойствах поверхности, могут различаться в несколько раз, поэтому достаточно точный учет поверхностных процессов имеет важное значение для создания новых космических аппаратов.

Усилия, направляемые для понимания и моделирования каталитических процессов на поверхности возвращаемых космических аппаратов, отражены в большом количестве моделей гетерогенной рекомбинации, построенных в последние годы. В настоящее время накоплен большой объем экспериментальных и теоретических исследований по высокотемпературному катализу в диссоциированном воздухе в связи с разработкой системы теплозащиты воздушно-космических самолетов "Space Shuttle" и "Буран" [1–7]. Первоначально в теоретических моделях гетерогенный катализ описывался реакциями первого порядка с константами скоростей, определяемыми из эксперимента. Позднее были предложены более точные модели [8–15], основанные на теории идеально адсорбированного слоя Ленгмюра [16]. Эти модели позволили при соответствующем подборе параметров удовлетворительно описать аэродинамический нагрев наветренной поверхности многоразовых космических аппаратов вдоль всей траектории спуска в атмосфере Земли [17].

Работ, посвященных изучению гетерогенного катализа при высоких температурах в диссоциированном углекислом газе на основе рассмотрения детального механизма гетерогенных каталитических процессов, значительно меньше. Для оценки тепловых потоков при входе в атмосферу Марса в [18–20] рассматривались предельные случаи идеально каталитической (максимальная скорость гетерогенной рекомбинации компонентов диссоциированного углекислого газа) и некаталитической поверхностей.

В [21, 22] для покрытий космических аппаратов, входящих в атмосферу Марса, предложены феноменологические модели, основанные на детальном рассмотрении механизма протекания гетерогенных каталитических реакций.

Первые результаты измерений параметров потока в высокочастотном плазматроне, а также теплового потока к каталитической поверхности и ее температуры в диссоциированном углекислом газе для трех видов покрытий теплозащитных материалов и кварца опубликованы в [23]. Там же определены значения эффективных констант скоростей гетерогенной каталитической рекомбинации атомов кислорода $O + O = O_2$ и молекул окиси углерода $CO + O = CO_2$ на поверхности рассмотренных покрытий. В [24] влияние этих реакций на химический состав у кварцевой поверхности исследовалось на основе экспериментов в диффузионной трубе.

В [25] построена модель гетерогенной рекомбинации диссоциированной смеси углекислого газа и азота на поверхности высокотемпературных теплозащитных материалов, учитывающая неравновесные реакции химической адсорбции – десорбции атомов кислорода и монооксида углерода, их рекомбинацию в реакциях Или – Райдила. С помощью интерпретации экспериментальных данных [23] получены явные зависимости коэффициентов каталитической активности от условий на поверхности (температуры, давления и концентраций) для исследованных в работе покрытий и проанализирована возможность использования их в системе теплозащиты космического аппарата "Mars miniprobe" при его входе в атмосферу Марса.

Заметим, что корректный подбор параметров модели катализа может быть осуществлен при достаточно точном знании механизма гетерогенной рекомбинации. Обычно при исследовании входа в атмосферу планет и анализе диффузионно-кинетических и газодинамических экспериментов, за исключением исследований при очень малых концентрациях, как правило, ограничиваются ударным механизмом рекомбинации Или – Ридела. Считается, что при характерной плотности активных мест на поверхности порядка $4.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-2}$, и температуре поверхности $T_w \leq 2000 \text{ К}$, вклад в рекомбинацию реакций Ленгмюра – Хиншельвуда между химически адсорбированными частицами будет незначительным в силу их ограниченной подвижности и больших расстояний между активными центрами. На основе ударного механизма рекомбинации удастся получить величины коэффициентов рекомбинации, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными как качественно, так и количественно [17, 25]. В том числе, можно объяснить немонотонную зависимость от температуры при температурах поверхности $T_w = 1300\text{--}2000 \text{ К}$.

В данной работе делается оценка влияния других механизмов гетерогенного катализа в диссоциированном углекислом газе на поверхности стекловидного покрытия теплозащитных материалов – физической адсорбции, реакций Ленгмюра – Хиншельвуда с участием физически и химически адсорбированных частиц, а также гетерогенной рекомбинации атомов углерода. Оценки получены на основе некоторых предложенных в литературе моделей этих процессов и сравнения их с экспериментальными данными.

Отметим, что учет реакций с участием физических адсорбированных частиц, связанных с поверхностью слабыми ван-дер-ваальсовыми силами, позволил объяснить обнаруженную в ряде экспериментов [6] немонотонную зависимость коэффициентов рекомбинации при достаточно низких температурах поверхности.

Ранее, при анализе входа тел в атмосферу обычно считалось, что физическая адсорбция протекает много быстрее, чем хемосорбция, и ею можно пренебречь. Модель, учитывающая поверхностную диффузию физически адсорбированных атомов, использована в [26] при интерпретации экспериментальных данных, полученных в диффузионном реакторе. При этом рассматривались атомы только одного сорта и пренебрегалось их взаимодействием с химически активными центрами поверхности. Гетерогенные каталитические реакции с участием физически адсорбированных частиц нескольких сортов учитывались в [27] при исследовании химического состава у поверхности космического аппарата, движущегося по стационарной орбите.

2. Рассматривались следующие процессы взаимодействия компонентов диссоциированного углекислого газа с каталитической поверхностью: 1) $O + S_v \rightleftharpoons O^s$, 2) $O^s + O \mapsto S_v + O_2$, 3) $O^s + CO \mapsto S_v + CO_2$, 4) $O + F_v \rightleftharpoons O^f$, 5) $O^f + S_v \mapsto O^s + F_v$, 6) $O^f + O^s \mapsto O_2 + F_v + S_v$, 7) $O^s + O^s \mapsto O_2 + 2S_v$.

Здесь A_j – химические символы компонентов в газовой фазе, а A_j^f и A_j^s – физические и химически адсорбированные компоненты; F_v и S_v – символы свободных мест на поверхности для физической и химической адсорбции соответственно.

Оценка влияния гетерогенной рекомбинации атомов С проводилась в двух предельных случаях: в приближении идеально каталитической и некаталитической поверхностей. В дальнейшем предполагается, что скорости поверхностных реакций измеряются в $1/m^2c$.

Константы скорости реакций адсорбции и реакций Или – Ридела k_i^+ определяются выражением вида

$$k_i^+ \left(\frac{m^3}{c} \right) = \frac{\gamma_i \langle v_m \rangle}{4N_v}, \quad \langle v_m \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi M}}$$

где γ_i – вероятность реакции, $\langle v_m \rangle$ – средняя тепловая скорость реагирующей частицы вблизи поверхности; $N_v = N_v^f$ или $N_v = N_v^s$ – число вакантных мест для физической или химической адсорбции соответственно, k – постоянная Больцмана, M – молекулярный вес. Константы скорости реакций Ленгмюра – Хиншельвуда задаются в виде

$$k_i^+ (m^2 / c) = \gamma_i D_m$$

где D_m – скорость поверхностной диффузии, определяемая выражением

$$D_m = \frac{v_{Dm}}{4N_v} \exp\left(-\frac{E_{Dm}}{T}\right)$$

Здесь v_{Dm} – частотный фактор, E_{Dm} – энергия активации поверхностной диффузии. Так же, как в [26, 27], для реакций 5, 6 принималось, что $v_{Dm} = 10^{13} c^{-1}$, а для реакции 7 значение частотного фактора вычислялось по формуле $v_{Dm} = C_D \langle v_m \rangle$, где $C_D = 2.2 \cdot 10^{10} m^{-1}$ [14]. Считалось, что $N_v^f = 10^{20} m^{-2}$, а $N_v^s = 5 \cdot 10^{18} m^{-2}$ [14, 27].

Вероятности скоростей реакций задавались в аррениусовом виде

$$\gamma_i = A_i \exp(-E_i / RT_w)$$

причем для реакций адсорбции энергия активации $E_i = 0$. Заметим, что для реакций Ленгмюра – Хиншельвуда значения E_{Dm} и E_i входят в виде суммы в экспоненциальный множитель, поэтому ниже мы будем считать, что $E_{Dm} = 0$, предполагая, что его значение уже включено в энергию активации соответствующей реакции.

Константы скоростей обратных реакций находились из принципа детального равновесия

$$k_i^+ / k_i^- = K_i(T_w)$$

где K_i – константы равновесия соответствующей реакции, которая выражается через статистические функции реагентов и теплоту реакции Q_i . Предполагалось, что статистические суммы свободных и адсорбированных частиц совпадают. Принятые в расчетах параметры гетерогенных реакций приведены в табл. 1.

Для реакций 1–3 использован один из наборов параметров, полученных в [25] на основе экспериментальных данных [23, 28] с учетом только механизма Или – Ридела.

Предэкспоненциальные множители и энергии активации реакций 4–6 выбраны на основе анализа данных, приведенных в [27], и условия согласования, рассчитанных для

Таблица 1

№	Реакция	A	E, кДж/моль	Q, кДж/моль	Источник
1	$O + S_v \rightleftharpoons O^s$,	0.025	0	300	[25]
2	$O^s + O \rightarrow S_v + O_2$	0.015	25	–	[25]
3	$O^s + CO \rightarrow S_v + CO_2$	0.015	15	–	[25]
4	$O + F_v \rightleftharpoons O^f$,	0.5	0	20	[27]
5	$O^f + S_v \rightarrow F_v + O^s$	0.053	0	–	[27]
6	$O^s + O_f \rightarrow F_v + S_v + O_2$	0.053	0	–	[27]
7	$O^s + O^s \rightarrow 2S_v + O_2$	0.02	125	–	[15]
	– » –	1.0	500	–	[14]

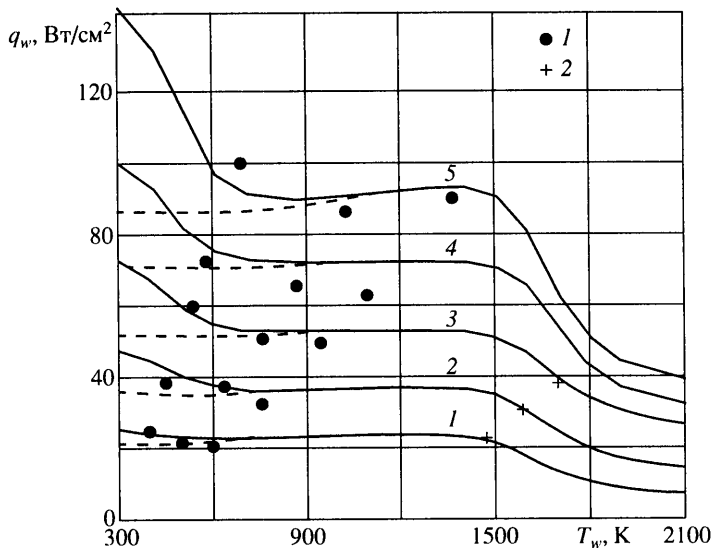
Таблица 2

Параметр	Режимы					
	1	2	3	4	5	6
T_w , К	3320	4360	5800	6256	6600	6875
V_s , м/с	47.3	76.1	105.6	118.0	145.0	164.0
q_w^{fc} , Вт/см ²	46.4	74.4	103.7	130.0	175.0	208.0
N , кВт	29	37	44	52	64	72
Δp , Па	10.5	17.5	24.5	26.2	33.75	38.8

режима 3 (табл. 2) и измеренных тепловых потоков на кварце при низких температурах [29].

3. Исследование влияния различных механизмов поверхностного катализа на теплообмен в диссоциированном углекислом газе проведено для стекловидного покрытия плиточной теплозащиты воздушно-космического самолета "Буран" и близкого к нему по каталитическим свойствам кварца. Для этих материалов на плазматроне ВГУ-4 ИПМ РАН получены данные по теплообмену в критической точке тестового образца в широком диапазоне параметров набегающего потока и значений температуры поверхности. Для этих же условий рассчитаны зависимости теплового потока от температуры поверхности T_w в диапазоне 300–2000 К с использованием различных моделей поверхностного катализа. Тепловые потоки рассчитывались на основе приближения пограничного слоя [23] конечной толщины с использованием модели газовой среды, описанной в [30]. При таком подходе состав газа на внешней границе пограничного слоя считается равновесным, а температура газа находится из условия совпадения расчетных и измеренных значений тепловых потоков q_w^{fc} к холодной идеально-каталитической поверхности. Последние были выбраны на основе анализа экспериментальных данных для медной и серебряной поверхностей [23, 28, 29] и приведены в табл. 2. Кроме того, в этой таблице для исследованных режимов обтекания приведены также скорость дозвуковой струи в центре выходного сечения канала плазматрона V_s , подводимая к индуктору мощность N и скоростной напор Δp . Для всех режимов испытаний статическое давление в потоке было 0.1 атм.

Данные, приведенные на фиг. 1, демонстрируют влияние физической адсорбции на зависимость теплового потока от температуры поверхности для пяти режимов испытаний. Сплошными кривыми показаны результаты расчетов с использованием модели катализа, включающей реакции 1–6 (табл. 1), пунктирными – результаты расчетов без учета физической адсорбции. Здесь и на других фигурах номер кривой соответствует номеру режима испытаний в табл. 2, точками 1 отмечены экспериментальные результаты, по которым выбирались параметры коэффициентов скоростей реакций Или – Ридела [23], точками 2 – экспериментальные данные для кварца [28, 29]. Зависимости тепловых потоков от температуры без учета физической



Фиг. 1. Зависимости от температуры тепловых потоков в критической точке тела с учетом (сплошные кривые) и без учета (штриховые кривые) физической адсорбции для различных режимов испытаний. Номера у кривых соответствуют номеру режима испытаний в табл. 2; точки 1 – экспериментальные результаты [23], точки 2 – экспериментальные данные для кварца [28, 29]

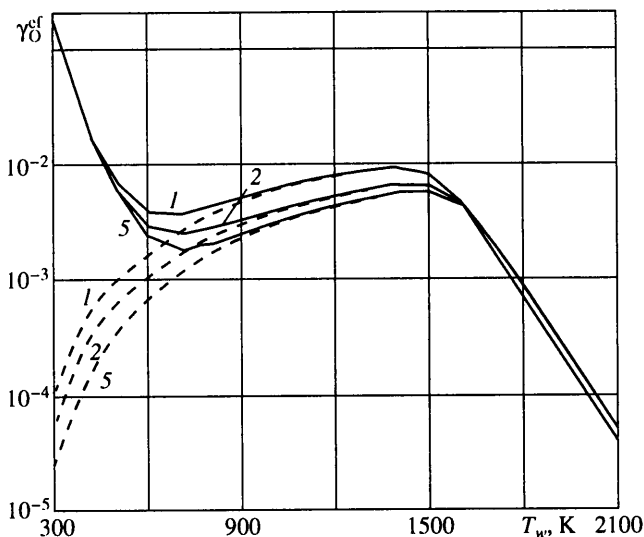
адсорбции (штриховые кривые) существенно отличаются от кривых, полученных с учетом этих процессов. Начиная с некоторой температуры поверхности, зависящей от режима испытаний, наблюдается повышение теплового потока при уменьшении температуры поверхности. Если же физическая адсорбция не учитывается, то такой эффект не наблюдается. Заметим, что при учете реакций с участием физически адсорбированных атомов улучшается согласование рассчитанных и измеренных значений тепловых потоков при низких температурах практически при всех рассмотренных режимах испытаний. В области достаточно высоких температур поверхности процессы физической адсорбции не влияют на величины тепловых потоков.

На фиг. 2, 3 представлены в зависимости от температуры эффективные коэффициенты гетерогенной рекомбинации $\gamma_{\text{O}}^{\text{ef}}$ и $\gamma_{\text{CO}}^{\text{ef}}$, определяемые из выражений

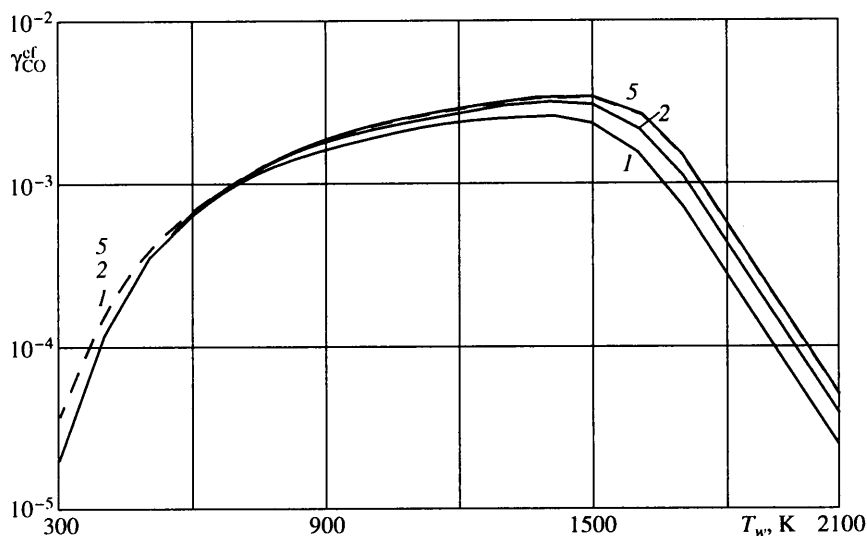
$$R_{\text{O}} = -\rho\gamma_{\text{O}}^{\text{ef}}\sqrt{\frac{RT}{2\pi m_{\text{O}}}}c_{\text{O}}, \quad R_{\text{CO}} = -\rho\gamma_{\text{CO}}^{\text{ef}}\sqrt{\frac{RT}{2\pi m_{\text{CO}}}}c_{\text{CO}}$$

Видно, что во всех рассмотренных режимах испытаний физическая адсорбция существенно влияет на величину эффективного коэффициента гетерогенной рекомбинации $\gamma_{\text{O}}^{\text{ef}}$ при $T_w < 600$ K и практически не сказывается на величине $\gamma_{\text{CO}}^{\text{ef}}$. Например, при $T_w = 300$ K учет физической адсорбции приводит к увеличению $\gamma_{\text{O}}^{\text{ef}}$ на три порядка. При $T_w \approx 600$ K наблюдается минимум эффективного коэффициента гетерогенной рекомбинации атомов кислорода. Повышение рекомбинационной способности каталитической поверхности при достаточно низких температурах поверхности связано с рекомбинацией на физически адсорбированных атомах, а при средних и высоких температурах поверхности – на хемосорбированных. Наблюдаемый в промежуточной области минимум теплового потока разделяет температурные области, в которых рекомбинация происходит с участием хемосорбированных и физических адсорбированных атомов.

На необходимость учета гетерогенных каталитических реакций с участием атомов углерода С при высоких энтальпиях потока указывалось в [29]. Температурные зави-

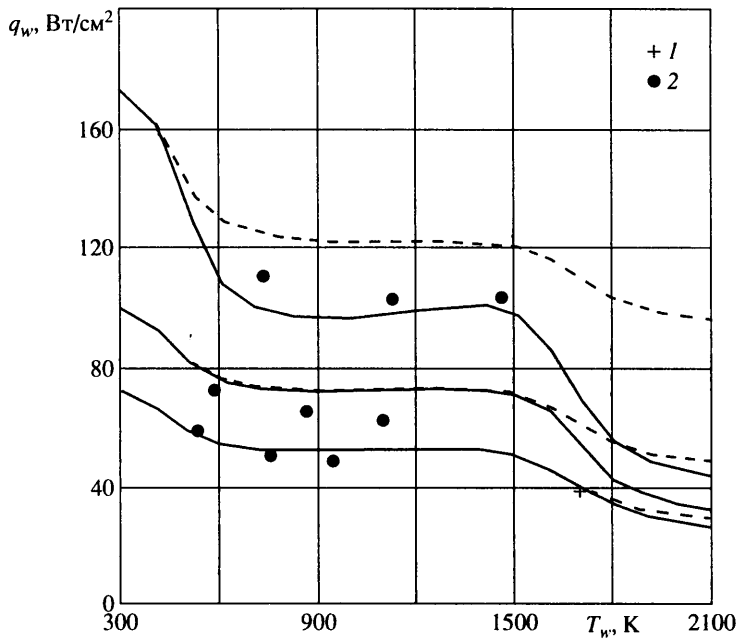


Фиг. 2. Зависимости от температуры эффективного коэффициента гетерогенной рекомбинации γ_O^{ef} для различных режимов испытаний. Номера у кривых соответствуют номеру режима испытаний в табл. 2

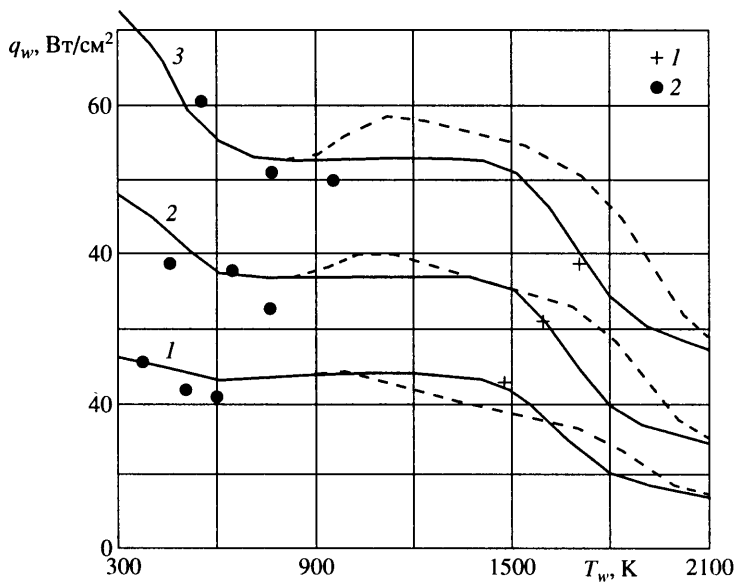


Фиг. 3. Зависимости от температуры эффективного коэффициента гетерогенной рекомбинации γ_{CO}^{ef} для различных режимов испытаний. Номера у кривых соответствуют номеру режима испытаний в табл. 2

симости на фиг. 4 позволяют оценить влияние каталитических реакций с участием атомарного углерода. Сплошными кривыми показаны значения тепловых потоков к поверхности химически нейтральной по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов С, штриховыми – тепловые потоки к поверхности, идеально-каталитической для рекомбинации этих атомов. Как и следовало ожидать, роль катализа атомов углерода возрастает с увеличением энтальпии набегающего потока, пропорциональной мощности плазматрона. При этом область значений температуры поверхности,



Фиг. 4. Зависимости от температуры тепловых потоков в критической точке тела с учетом реакций с атомарным углеродом для различных режимов испытаний. Номера у кривых соответствуют номеру режима испытаний в табл. 2; точки 1 – экспериментальные результаты [23], точки 2 – экспериментальные данные для кварца [28, 29]



Фиг. 5. Зависимости от температуры тепловых потоков в критической точке тела с учетом реакций Ленгмюра – Хиншельвуда для различных режимов испытаний. Номера у кривых соответствуют номеру режима испытаний в табл. 2; точки 1 – экспериментальные результаты [23], точки 2 – экспериментальные данные для кварца [28, 29]

в которой влияние рекомбинации атомов С становится заметной, расширяется в сторону низких температур. Следует отметить, что на величины тепловых потоков, которые исследовались в [25], этот процесс практически не влияет.

На фиг. 5 штриховыми кривыми показаны результаты расчетов с учетом реакции Ленгмюра – Хиншельвуда под номером 7 в табл. 1. Для коэффициентов этой реакции использовались параметры, предложенные в [15]. Данная модель приводит к более высоким значениям тепловых потоков при высоких температурах поверхности и не оказывает влияния на тепловые потоки при достаточно низких температурах поверхности. Расчеты показали, что величины тепловых потоков, вычисленные с использованием для этой реакции параметров, предложенных в [14], практически совпадают с тепловыми потоками, полученными в том случае, когда реакция 7 (табл. 1) не учитывается. Необходимы дополнительные экспериментальные данные в области высоких температур поверхности для уточнения значений коэффициентов скоростей реакций Ленгмюра – Хиншельвуда с участием хемосорбированных атомов.

Заключение. На основе теории идеального адсорбированного слоя Ленгмюра и сравнения с экспериментальными данными создана кинетическая модель гетерогенной рекомбинации на поверхности высокотемпературного теплозащитного материала в диссоциированной смеси углекислого газа, учитывающая неравновесные реакции физической и химической адсорбции-десорбции атомов кислорода и их рекомбинацию в реакциях Или – Ридела и Ленгмюра – Хиншельвуда.

Учет реакций с участием физически адсорбированных частиц позволил объяснить обнаруженную в ряде экспериментов немонотонную зависимость коэффициентов рекомбинации при невысоких температурах поверхности. Повышение рекомбинационной способности каталитической поверхности при достаточно низких температурах поверхности связано с рекомбинацией на физически адсорбированных атомах, а при достаточно высоких температурах поверхности – на хемосорбированных. Наблюдаемый в промежуточной области минимум теплового потока разделяет температурные области, в которых рекомбинация происходит с участием хемосорбированных и физически адсорбированных атомов.

В тех условиях, при которых определялись параметры модели [25], рекомбинация атомов углерода не оказывает влияния на теплообмен. Однако ее влияние увеличивается при увеличении энтальпии набегающего потока.

Для более точного моделирования каталитических свойств поверхности с учетом процессов Ленгмюра – Хиншельвуда с участием хемосорбированных атомов необходимы дополнительные экспериментальные данные в более широком диапазоне определяющих параметров.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 99-01-00259) и ФЦП "Интеграция" (№ А0112(414)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баронец П.Н., Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. и др. Отработка теплозащитных материалов орбитального корабля "Буран" на индукционных плазматронах // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации 1990, 1991. М.: Наука, 1991. С. 41–52.
2. Лозино-Лозинский Г.Е. Полет "Бурана" // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации 1989. М.: Наука, 1990. С. 6–21.
3. Scott C.D. Effect of nonequilibrium and wall catalysis on shuttle heat transfer // J. Spacecraft and Rockets. 1985. V. 22. № 5. P. 489–499.
4. Kolodziej P., Stewart D.A. Nitrogen recombination on high-temperature reusable surface insulation and the analysis of its effect on surface catalysis AIAA Paper. 1987. № 87-1637. 10 p.
5. Полянский О.Ю., Кузнецов М.М., Меньшикова В.Л. и др. Влияние свойств реального газа на аэродинамические и тепловые характеристики гиперзвуковых летательных аппаратов // ЦАГИ. ОНТИ. Обзоры. 1987. № 676. 200 с.
6. Беркут В.Д., Дорошенко В.М., Ковтун В.В., Кудрявцев Н.Н. Неравновесные физико-химические процессы в гиперзвуковой аэродинамике. М.: Энергоатомиздат, 1994. 400 с.
7. Ковалев В.Л. Гетерогенные каталитические процессы при входе в атмосферу. М.: Изд-во ЦПИ при мех.-мат. факультете МГУ, 1999. 128 с.

8. Ковалев В.Л., Суслов О.Н. Модель взаимодействия частично ионизованного воздуха с каталитической поверхностью // Исследования по гиперзвуковой аэродинамике и теплообмену с учетом неравновесных химических реакций. М.: Изд-во МГУ, 1987. С. 58–69.
9. Ковалев В.Л., Суслов О.Н. Моделирование взаимодействия частично ионизованного воздуха с каталитической поверхностью высокотемпературной многоразовой теплоизоляции // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 5. С. 179–190.
10. Залогин Г.Н., Лунев В.В. О каталитических свойствах материалов в неравновесном потоке диссоциированного воздуха // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 5. С. 161–170.
11. Seward W.A., Jumper E.J. Model for oxygen recombination on silicon dioxide surfaces // J. Thermoph. and Heat Transfer. 1991. V. 5. № 3. P. 284–291.
12. Willey R.J. Comparison of kinetic models for atom recombination on high-temperature reusable insulation // J. Thermoph. and Heat Transfer. 1993. V. 7. № 1. P. 55–62.
13. Deutschmann O., Riedel U., Warnatz J. Modeling of nitrogen and oxygen recombination on partial catalytic surfaces // Trans. ASME J. Heat Transfer. 1995. V. 117. № 2. P. 495–501.
14. Nasuti F., Barbato M., Bruno C. Material-dependent catalytic recombination modeling for hypersonic flows // J. Thermoph. and Heat Transfer. 1996. V. 10. № 1. P. 131–136.
15. Daiss A., Frühauf H.H., Messerschmid E.W. Modeling of catalytic reactions on silica surfaces with consideration of slip effects // J. Thermoph. and Heat Transfer. 1997. V. 11. № 3. P. 346–352.
16. Langmuir I. Monolayers on solids // J. Chem. Soc. 1940. V. 4. P. 511–543.
17. Ковалев В.Л., Колесников А.Ф., Крупнов А.А., Якушин М.И. Анализ феноменологических моделей, описывающих каталитические свойства высокотемпературных многоразовых покрытий // Изв. РАН. МЖГ. 1996. № 6. С. 133–144.
18. Chen Y.-K., Henline W.D., Stewart D.A., Candler G.V. Navier-Stokes solution with surface catalysis for Martian atmospheric entry // J. Spacecraft and Rockets. 1993. V. 30. № 1. P. 32–42.
19. Mitcheltree R.A., Gnoffo P.A. Wake flow about the Mars Pathfinder entry vehicle // J. Spacecraft and Rockets. 1995. V. 32. № 5. P. 771–776.
20. Gupta R.N., Lee K.P., Scott C.D. Aerothermal study of Mars Pathfinder aeroshell // J. Spacecraft and Rockets. 1996. V. 33. № 1. P. 61–69.
21. Ковалев В.Л. Феноменологические модели каталитических свойств теплозащитных покрытий космических аппаратов, входящих в атмосферу Марса // Тр. 14 сессии Междунар. школы по моделям механики сплошной среды. М.: Изд-во МФТИ, 1998. С. 83–91.
22. Ковалев В.Л. Моделирование каталитических свойств теплозащитных покрытий при входе в атмосферу Марса // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 1999. № 1. С. 37–43.
23. Быкова Н.Г., Васильевский С.А., Гордеев А.Н. и др. Определение эффективных вероятностей каталитических реакций на поверхностях теплозащитных материалов в потоках диссоциированного углекислого газа // Изв. РАН. МЖГ. 1997. № 6. С. 144–157.
24. Serpka S., Chen Y.-K., Marshall J., Copeland R.A. Experimental investigation of surface reactions in carbon monoxide and oxygen mixtures // J. Thermoph. and Heat Transfer. 2000. V. 14. № 1. P. 45–52.
25. Афонина Н.Е., Громов В.Г., Ковалев В.Л. Моделирование каталитических свойств покрытий высокотемпературных теплозащитных материалов в диссоциированной смеси углекислого газа и азота // Изв. РАН. МЖГ. 2000. № 1. С. 106–116.
26. Kim Y.C., Boudart M. Recombination of O, N, and H atoms on silica: kinetics and mechanism // Langmuir. 1991. V. 7. № 12. P. 2999–3005.
27. Gordiets B.F., Ferreira C.M. Self-consistent modelling of volume and surface processes in air plasma // AIAA Journal. 1998. V. 36. № 9. P. 1643–1651.
28. Якушин М.И., Колесников А.Ф., Гордеев А.Н. и др. Экспериментальное и численное исследование теплового эффекта катализа в теплообмене высокоэнтальпийных дозвуковых потоков углекислого газа с поверхностями материалов // Отчет по проекту 036 МНТЦ "Разработка теплозащитных систем для межпланетных полетов". М.: Ин-т механики МГУ, 1998. 82 с.
29. Kolesnikov A.F., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A., Jakushin M.I. Study of quartz surface catalyticity in dissociated carbon dioxide subsonic flows // J. Spacecraft and Rockets. 2000. V. 37. № 5. P. 573–579. (AIAA Paper. 1998. № 98-2847. 11 p.)
30. Афонина Н.Е., Громов В.Г. Исследование на основе модели вязкого ударного слоя течения в области торможения при входе космического аппарата в марсианскую атмосферу. Препринт № 31-97. М.: Ин-т механики МГУ, 1997. 73 с.