

УДК 629.7.036

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ОБОБЩЕННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

© 2023 г. В. В. Миронов\*, М. А. Толкач, В. В. Тлевцежев

АО ГНЦ ФГУП “Центр Келдыша”, Москва, Россия

\*E-mail: kerc@elnet.msk.ru

Поступила в редакцию 21.10.2022 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 11.05.2023 г.

Предложен метод анализа роли отдельных химических реакций на тепломассообмен в реагирующем пограничном слое, и проведены оценки влияния тепловых эффектов на обобщенный коэффициент тепломассообмена. Установлено, что наличие эндотермических реакций в пограничном слое существенно влияет на обобщенный коэффициент тепломассообмена. Влияние тепловых эффектов гомогенных реакций внутри пограничного слоя на конвективный тепловой поток  $\dot{q}_l$  эквивалентно учету теплоты этих реакций на поверхности теплозащитного покрытия, т.е. на поверхности прококсованного слоя.

DOI: 10.31857/S0040364423040105

### ВВЕДЕНИЕ

Расчет турбулентного пограничного слоя при наличии гетерогенного реагирования на поверхности и гомогенного реагирования в пограничном слое представляет значительный интерес [1–4]. Эта задача возникает также при определении скорости химического разрушения коксового остатка теплозащитного покрытия (ТЗП) при одновременном вдуве пиролизных газов, содержащих реакционно способные вещества [1, 2, 5, 6]. Теоретические модели и методы расчета пограничных слоев с химическими реакциями представлены в работах [3, 7, 8] и сборнике статей [9] (более 20 работ).

В работе [4] отмечено, что коэффициент теплопередачи в реактивном пограничном слое может увеличиваться от –5% до 50% по сравнению с инертным значением.

В [6] предложен метод расчета и проведены оценки тепловых эффектов гомогенных реакций окисляющих компонентов из нагревающего потока (с активными компонентами продуктов пиролиза резиноподобной тепловой защиты (резиноподобных материалов – РПМ) и гетерогенных реакций с углеродом прококсованного слоя теплозащитного покрытия. Установлено, что указанные реакции сопровождаются значительным эндотермическим эффектом. Настоящая работа является продолжением работы [6].

Целью работы является определение поправочных коэффициентов к обобщенному коэффициенту тепломассообмена, учитывающих наличие тепловых эффектов гомогенных и гетерогенных реакций в пограничном слое.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Рассмотрим решение задачи гомогенного реагирования окислительных компонентов из нагревающего потока со смесью активных пиролизных компонентов [5] в пограничном слое и гетерогенных реакций с углеродом прококсованного слоя на его поверхности (рис. 1). При анализе используется приближение диффузионного режима [3, 6].

При рассмотрении пограничного слоя с гомогенными реакциями в диффузионном режиме вполне оправданным является подход с использованием одностадийной химической реакции [3]. В этом случае значение безразмерной

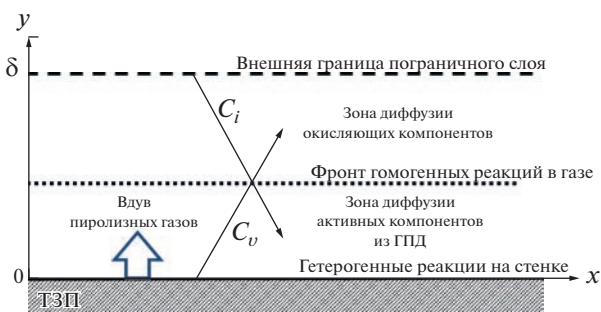
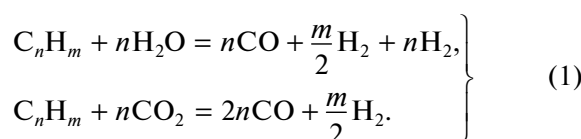


Рис. 1. Схема пограничного слоя с химическими реакциями:  $C_i$  – концентрация  $i$ -х окисляющих компонентов из внешнего (нагревающего) потока;  $C_v$  – концентрация  $v$ -х активных (вступающих в реакции) компонентов из вдуваемого газа [2].

энтальпии во фронте горения не зависит от режима течения, а определяется параметром вдува, составом горючего и окислителя и их концентрациями в ядре потока и во вдуваемом газе [3]. Положение фронта гомогенных реакций (рис. 1) зависит от интенсивности вдува и определяется составом горючего и окислителя и их концентрациями в ядре потока и во вдуваемом газе.

Рассмотрим решение частной задачи реагирования окислительных компонентов  $H_2O$  и  $CO_2$  из нагревающего потока со смесью активных пиролизных компонентов в виде газа  $C_nH_m$  [5, 6] в пограничном слое (рис. 1), т.е. с учетом следующих гомогенных реакций:

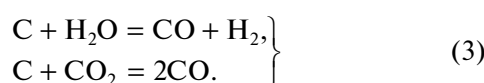


Стехиометрические коэффициенты  $\vartheta_{v,i}$  в данных реакциях для  $i$ -го окисляющего компонента с химически активной долей вдуваемого газа определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_{v,1} = \vartheta_{v,H_2O} &= n \frac{M_{H_2O}}{M_{C_nH_m}}, \\ \vartheta_{v,2} = \vartheta_{v,CO_2} &= n \frac{M_{CO_2}}{M_{C_nH_m}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $M$  – молекулярная масса соответствующего компонента.

Не прореагировавшие в пограничном слое окислительные компоненты из нагревающего потока достигают поверхности ТЗП и вступают с углеродом прококсованного слоя в следующие гетерогенные реакции:



Эти реакции протекают в тонком мономолекулярном слое, удерживаемом силами химической адсорбции [10]. Для реакций (3) стехиометрические коэффициенты определяются соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \vartheta_{C,1} = \vartheta_{C,H_2O} &= \frac{M_{H_2O}}{M_C}, \\ \vartheta_{C,2} = \vartheta_{C,CO_2} &= \frac{M_{CO_2}}{M_C}. \end{aligned} \right\}$$

Как в гомогенных реакциях с пиролизным газом (1), так и гетерогенных реакциях с коксовым остатком (3) образуются два компонента:  $CO$  и  $H_2$ . Далее полагается, что эти компоненты химически инертны, а реакции (1), (3) протекают независимо друг от друга.

Распределение  $H_2O$  и  $CO_2$  между химическими процессами (1), (3) зависит от интенсивности вдува

активных пиролизных газов и подробно рассмотрено в [6]. Здесь только отметим, что при недостаточном для стехиометрического реагирования во фронте (рис. 1) количестве вдуваемых газов неизрасходованная в зоне гомогенных реакций часть окисляющих компонентов из нагревающего потока диффундирует к поверхности прококсованного слоя ТЗП и вступает в гетерогенные реакции с углеродом прококсованного слоя [11].

Из условия сохранения атомарных компонентов при реакциях в газовой фазе (1) следуют соотношения для скоростей стока  $\dot{m}_v$ ,  $\dot{m}_i$  и образования  $\dot{m}_{CO}$ ,  $\dot{m}_{H_2}$  компонентов смеси:

$$\dot{m}_v = \sum_i \frac{\dot{m}_i}{\vartheta_{v,i}}, \quad (4)$$

$$\dot{m}_{j,1} = \dot{m}_{CO} = n \frac{M_{CO}}{M_v} \dot{m}_v + \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} \dot{m}_{CO_2} \quad (5)$$

для реакций с  $CO_2$ ,

$$\dot{m}_{j,2} = \dot{m}_{H_2} = \frac{m}{2} \frac{M_{H_2}}{M_v} \dot{m}_v + \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \dot{m}_{H_2O} \quad (6)$$

для реакций с  $H_2O$ .

Индекс  $i$  – окислительный компонент из нагревающего внешнего потока;  $j$  – образующиеся в процессе реакций продукты;  $v$  – активные компоненты из вдуваемых пиролизных газов.

Если число Дамкелера  $Da$ , для гетерогенных реакций на поверхности конечно, то скорости процессов массопереноса и гетерогенного химического реагирования одного порядка. В этом случае, как отмечено в [1], необходимо учитывать кинетику гетерогенных химических реакций. В рассматриваемом случае для реакций  $i$ -х окисляющих компонентов продуктов нагревающего потока с углеродом коксового остатка кинетическое уравнение используется в виде степенного закона Аррениуса [1, 2]:

$$\dot{m}_i^C = Z_w C_{i,w}, \quad (7)$$

$$Z_w = K \frac{P_w}{RT_w} \exp\left(-\frac{E}{RT_w}\right), \quad (8)$$

где  $\dot{m}_i^C$  – скорость стока  $i$ -го окисляющего компонента нагревающего газа при реакции с углеродом коксового остатка;  $P_w$  – давление среды вблизи стенки;  $E$  – энергия активации;  $K$  – константа скорости реакции (1/с);  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T_w$  – температура поверхности;  $C_{i,w}$  – концентрации  $i$ -х окисляющих компонентов нагревающего газа на поверхности коксового остатка.

Отметим, что предлагаемый подход позволяет в пределе рассматривать реагирование на поверхности и в диффузионном режиме.

Как известно [12, 13], квазистационарный процесс тепломассообмена при наличии химических

реакций в пограничном слое описывается системой дифференциальных уравнений, включающих уравнение энергии и соответствующие уравнения сохранения (диффузии) для отдельных компонентов. При этом, если вместо уравнений сохранения для компонентов использовать уравнения сохранения для химических элементов, то при числе Прандтля  $Pr = 1$  и числе Льюиса  $Le = 1$  имеет место аналогия процессов тепло- и массопереноса [1].

Для полной энтальпии (по всем компонентам в пограничном слое) с учетом  $Le = 1$  и  $Pr = 1$  уравнение сохранения энергии приобретает следующий вид [1, 13]:

$$\rho u \frac{\partial H}{\partial x} + \rho v \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial H}{\partial y} \right). \quad (9)$$

Полная энтальпия газовой смеси  $H$  в (9) определяется соотношением [3, 14]:

$$H = \sum_{k=1}^n \left[ \int_{T_0}^T c_{pk} dT + h_k^0 \right] C_k,$$

где  $x, y$  – соответственно координаты вдоль и по нормали к поверхности ТЗП (кокса) (рис. 1);  $c_{pk}$ ,  $h_k^0$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении и энтальпия образования  $k$ -го вещества при стандартной температуре  $T_0 = 298$  К (количество тепла, которое выделяется или поглощается при образовании  $k$ -го компонента);  $C_k$  – массовая концентрация  $k$ -го вещества;  $C_p$  – удельная теплоемкость смеси газов;  $\lambda$  – коэффициент турбулентной (молекулярной) теплопроводности смеси газов.

Уравнения диффузии следующие:

для  $i$ -х окисляющих компонентов из нагревающего потока

$$\rho u \frac{\partial C_i}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) - \dot{m}_i, \quad (10)$$

для  $v$ -х активных компонентов из вдуваемых продуктов пиролиза РПМ

$$\rho u \frac{\partial C_v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial C_v}{\partial y} \right) - \dot{m}_v, \quad (11)$$

для образующихся в результате гомогенных и гетерогенных реакций  $j$ -х продуктов

$$\rho u \frac{\partial C_j}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_j}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial C_j}{\partial y} \right) + \dot{m}_j, \quad (12)$$

для инертных компонентов из нагревающего потока  $C_{in,e}$

$$\rho u \frac{\partial C_{in,e}}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_{in,e}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial C_{in,e}}{\partial y} \right), \quad (13)$$

для инертных компонентов из вдуваемого пиролизного газа  $C_{in,v}$

$$\rho u \frac{\partial C_{in,v}}{\partial x} + \rho v \frac{\partial C_{in,v}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial C_{in,v}}{\partial y} \right). \quad (14)$$

В уравнениях (10)–(14) скорости газа  $u, v$  рассматриваются как известные независимые параметры, определяемые из решения уравнений движения (задачи газовой динамики).

Предполагается, что газ на внешней поверхности пограничного слоя ( $y = \delta$ , рис. 1) находится в термодинамическом равновесии, т.е. определяется значениями температуры и давления. В этом случае обычно полагается [1]

$$u = u_e, v = 0; \quad C_i = C_{i,e}, \\ C_v = C_{v,e} = 0, \quad C_j = C_{j,e} = 0,$$

где  $C_{i,e}$  – концентрация  $i$ -х окисляющих компонентов на границе пограничного слоя.

Если разрушение материала происходит без образования жидкой пленки, то при  $y = 0$  (рис. 1) справедливо [1]:

$$u = 0, \quad v = v_w, \quad C_i = C_{i,w}, \quad H = H_w.$$

В качестве граничных условий на поверхности ТЗП (кокса) для уравнений диффузии (10)–(14) принимаются справедливыми следующие гипотезы (балансные соотношения).

Для  $i$ -го окисляющего компонента у поверхности покрытия для уравнения (10):

$$\left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right)_w = (\rho v)_w C_{i,w} + (\rho v)_{C_i} \vartheta_{C_i}, \quad (15)$$

где  $\left( \frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right)_w$  – концентрационная диффузия к поверхности;  $(\rho v)_w C_{i,w}$  – массовый отток (оттеснение)  $i$ -го окисляющего компонента из нагревающего потока от поверхности за счет вдува газов в пограничный слой;  $(\rho v)_{C_i} \vartheta_{C_i}$  – сток  $i$ -го окисляющего компонента из набегающего потока на окисление углерода прококсованного слоя (реактивное происходит в соответствии с брутто-реакцией (3));  $(\rho v)_w = (\rho v)_c + G$  – суммарный удельный расход вдуваемых в пограничный слой газов,  $G$  – удельный расход вдуваемых продуктов термической деструкции ТЗП в кг/(м<sup>2</sup> с);  $(\rho v)_{C_i}$  – удельный расход углерода кокса в результате химического взаимодействия с  $i$ -м окисляющим компонентом нагревающего потока;  $(\rho v)_c = \sum_i (\rho v)_{C_i}$  – удельный расход углерода кокса в результате химического взаимодействия со всеми  $i$ -ми активными компонентами нагревающего потока, достигаю-

щими поверхности;  $\vartheta_{C,i}$  – стехиометрические коэффициенты реакций  $i$ -х окисляющих компонентов с углеродом прококсованного слоя ТЗП.

Для активных компонентов из продуктов пиролиза ТЗП у поверхности покрытия для уравнения (11):

$$\left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial C_v}{\partial y} \right)_w = (\rho v)_w C_{v,w} - G g_v, \quad (16)$$

где  $G g_v$  – поступление химически активных компонентов с пиролизным газом;  $(\rho v)_w C_{v,w}$  – конвективный отток  $v$ -го компонента от поверхности (обусловленный вдувом);  $g_v$  – весовая доля химически активного вдуваемого газа в продуктах пиролиза.

Для  $j$ -х продуктов реакции у поверхности ТЗП для уравнения (12):

$$\left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial C_j}{\partial y} \right)_w = (\rho v)_w C_{j,w} - \dot{m}_j^C, \quad (17)$$

где  $\dot{m}_j^C$  – скорость образования  $j$ -го продукта при реакции с коксом;  $C_{j,w}$  – концентрация у поверхности кокса  $j$ -го продукта реакции, образующегося в гомогенных и гетерогенных реакциях.

Для инертных продуктов из нагревающего потока у поверхности для уравнения (13):

$$\left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial C_{in}^0}{\partial y} \right)_w = (\rho v)_w C_{in,e}^w. \quad (18)$$

Для инертных продуктов из газообразных продуктов пиролиза для уравнения (14):

$$\left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial C_{in}^v}{\partial y} \right)_w = (\rho v)_w C_{in,w}^v - (1 - g_v) G, \quad (19)$$

где  $(1 - g_v) G$  – поступление инертных продуктов пиролиза.

Тепловой баланс на подвижной границе (рис. 2) у поверхности для уравнения энергии (9), т.е. тепловой поток  $\dot{q}_\lambda$  в ТЗП  $\left( -\lambda_{\text{РПМ}} \frac{dT}{dn} \right)$  будет определяться соотношением [1, 2, 7, 9, 12, 15]

$$\dot{q}_\lambda = q_w - (\rho v)_w H_w + (\rho v)_c H_{C,w} + G H_{f,w}. \quad (20)$$

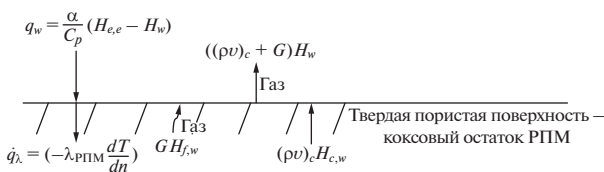


Рис. 2. Схема тепловых потоков на поверхности коксующегося РПМ [7].

Тепловой поток к поверхности ТЗП, обусловленный конвекцией, теплопроводностью и диффузией  $q_w$ , находится известным выражением [2]

$$q_w = \left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial H}{\partial y} \right)_w = \frac{\alpha}{C_p} (H_{e,e} - H_w). \quad (21)$$

Здесь  $\frac{\alpha}{C_p}$  – стандартный обобщенный коэффициент теплообмена;  $H_{e,e}$  – полная энтальпия смеси газов нагревающего потока на внешней границе пограничного слоя;  $H_w$  – полная энтальпия смеси газов у поверхности ТЗП (с учетом компонентов от химических реакций) при температуре поверхности  $T_w$ .

В то же время, как отмечено в [7, 9], от поверхности раздела уносится нормальный поток энтальпии со скоростью  $((\rho v)_c + G)H_w$  в пограничный слой газа, а по направлению к поверхности раздела со стороны прококсованного слоя подводится поток энтальпии  $(\rho v)_c H_{C,w}$  с углеродом прококсованного слоя. В случае коксующихся материалов (РПМ) в правую часть (20) добавляется и поток энтальпии  $G H_{f,w}$  с пиролизным газом, образующимся в реакциях термической деструкции внутри покрытия;  $H_{C,w}$  – полная энтальпия углерода коксового остатка при  $T = T_w$ ;  $H_{f,w}$  – полная энтальпия вдуваемых пиролизных газов при  $T = T_w$  (сумма полных энтальпий для активной и инертной составляющих пиролизного газа).

## СПОСОБ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи используется подход, схематически изложенный в [7, 9]. Для этого проведем преобразования и представим условие (20) в виде

$$\dot{q}_\lambda = \left( \frac{\alpha}{C_p} \right)_k (H_{e,e} - H_{e,w}), \quad (22)$$

где  $\left( \frac{\alpha}{C_p} \right)_k$  – обобщенный коэффициент теплообмена, учитывающий гомогенные и гетерогенные реакции в пограничном слое;  $H_{e,w}$  – энтальпия газов нагревающего потока при температуре поверхности.

Согласно (20), для вычисления  $\dot{q}_\lambda$  необходимо определить  $(\rho v)_w H_w$  с учетом тепловых эффектов химических реакций, которые могут осуществляться как внутри пограничного слоя, так и с материалом (углеродом) прококсованного слоя ТЗП. Для этого используются принятые гипотезы (15)–(19). После относительно несложных преобразований получаем следующее.

Для окисляющих компонентов из нагревающего потока согласно (15), (21) и (10), (17):

$$\frac{\alpha}{C_p} \{C_{i,w}\} = (\rho v)_w C_{i,w} + \frac{\alpha}{C_p} C_{i,w} - \frac{\alpha}{C_p} C_{i,e} + Z_w C_{i,w}, \quad (23)$$

$$\{C_{i,w}\} = \left( \frac{\partial C_i}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{i,w} - C_{i,e}.$$

Здесь и далее  $\bar{H} = \frac{H - H_w}{H_{e,e} - H_w}$ .

Для смеси активных вдуваемых газов согласно (16), (21) и (10):

$$\frac{\alpha}{C_p} \{C_{v,w}\} = \frac{\alpha}{C_p} C_{v,w} (1 + B) - g_v G, \quad (24)$$

$$\{C_{v,w}\} = \left( \frac{\partial C_v}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{v,w}.$$

Для продуктов реакций согласно (17), (21):

$$\frac{\alpha}{C_p} \{C_{CO,w}\} = \frac{\alpha}{C_p} C_{CO,w} (1 + B) -$$

$$- Z_w \frac{M_{CO}}{M_C} \sum_i \frac{C_{i,w}}{\vartheta_{C,i}} - Z_w \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} C_{CO_2,w}, \quad (25)$$

$$\{C_{CO,w}\} = \left( \frac{\partial C_{CO}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{CO,w},$$

$$\frac{\alpha}{C_p} \{C_{H_2,w}\} = \frac{\alpha}{C_p} C_{H_2,w} (1 + B) - Z_w \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} C_{H_2O,w}, \quad (26)$$

$$\{C_{H_2,w}\} = \left( \frac{\partial C_{H_2}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{H_2,w}.$$

Для инертных компонентов из вдуваемых газов согласно (19):

$$\frac{\alpha}{C_p} \{C_{in,v}^w\} = \frac{\alpha}{C_p} C_{in,v}^w (1 + B) - (1 - g_v) G. \quad (27)$$

Для инертных компонентов из нагревающего потока согласно (18):

$$\frac{\alpha}{C_p} \{C_{in,e}^w\} = \frac{\alpha}{C_p} C_{in,e}^w (1 + B) - \frac{\alpha}{C_p} C_{in,e}^e, \quad (28)$$

где  $C_{in,e}^w, C_{in,e}^e$  – концентрации инертных компонентов из нагревающего потока на поверхности ТЗП и на границе пограничного слоя соответственно;  $B = (\rho v)_w / \left( \frac{\alpha}{C_p} \right)$  – параметр вдува.

Использовалось также соотношение  $\left( \frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial C_i}{\partial y} \right)_w = \frac{\alpha}{C_p} \left( \frac{\partial C_i}{\partial \bar{H}} \right)_w$ , следующее из (21).

Умножив каждое из уравнений (23)–(28) на соответствующие энтальпии компонентов  $H_{\xi,w}$  при  $T = T_w$  и просуммировав, получаем зависимость теплосодержания газов в области прококсованного слоя, прилегающей к поверхности (тонком пограничном слое, который образуется на межфазной поверхности), от концентрации компонентов:

$$\frac{\alpha}{C_p} \sum_{\xi} \{C_{\xi,w}\} H_{\xi,w} = (\rho v)_w H_w +$$

$$+ \frac{\alpha}{C_p} H_w - G H_{f,w} - \frac{\alpha}{C_p} H_{e,w} +$$

$$+ Z_w \sum_i C_{i,w} H_{i,w} - Z_w \left[ \frac{M_{CO}}{M_C} H_{CO,w} \sum_i \frac{C_{i,w}}{\vartheta_{C,i}} + \right. \quad (29)$$

$$\left. + \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} C_{CO_2,w} H_{CO,w} + \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} C_{H_2O,w} H_{H_2,w} \right].$$

В (29) использованы следующие обозначения:

– для полной энтальпии пиролизных газов  $H_{f,w}(T_w)$   $H_{f,w} = (1 - g_v) H_{in,v}^w + g_v H_{v,w}$  – сумма энтальпий для инертной и активной составляющих пиролизных газов;

– полная энтальпия  $H_w(T_w)$  смеси газов (включая в данном случае продукты реакции – CO, H<sub>2</sub> и все инертные компоненты)

$$H_w = \sum_i C_{i,w} H_{i,w} + C_{v,w} H_{v,w} + C_{CO,w} H_{CO,w} +$$

$$+ C_{H_2,w} H_{H_2,w} + C_{in,v}^w H_{in,v}^w + C_{in,e}^w H_{in,e}^w;$$

– полная энтальпия смеси газов нагревающего потока  $H_{e,w}(T_w)$ :

$$H_{e,w} = \sum_i C_{i,e} H_{i,w} + C_{in,e}^e H_{in,e}^w,$$

где  $H_{in,e}^w$  – энтальпия инертных компонентов из нагревающего потока при  $T_w$ .

Выразив из (29)  $(\rho v)_w H_w$ , используя (22) и подставив в (20), получаем

$$\dot{q}_\lambda = \left( \frac{\alpha}{C_p} (H_{e,e} - H_w) + \frac{\alpha}{C_p} H_w - \frac{\alpha}{C_p} H_{e,w} \right) +$$

$$+ \frac{\alpha}{C_p} \sum_{\xi} \{C_{\xi,w}\} H_{\xi,w} + (\rho v)_C H_{C,w} +$$

$$+ Z_w \left\{ \sum_i C_{i,w} \left[ H_{i,w} - \frac{M_{CO}}{M_C} \frac{H_{CO,w}}{\vartheta_{C,i}} \right] - \right.$$

$$\left. - \frac{M_{CO}}{M_C} \frac{H_{CO,w}}{\vartheta_{C,CO_2}} C_{CO_2,w} - \frac{M_{H_2}}{M_C} \frac{H_{H_2,w}}{\vartheta_{C,H_2O}} C_{H_2O,w} \right\}.$$

После сокращения на  $\frac{\alpha}{C_p} H_w$  и с учетом того, что, согласно (7), (8),  $(\rho v)_C = Z_w \sum_i \frac{C_{i,w}}{\vartheta_{C,i}}$ , находим

$$\begin{aligned} \dot{q}_\lambda = & \frac{\alpha}{C_p} (H_{e,e} - H_{e,w}) - \frac{\alpha}{C_p} \sum_\xi \{C_{\xi,w}\} H_{\xi,w} + \\ & + Z_w \left\{ \sum_i \left[ C_{i,w} \left[ H_{i,w} + \frac{H_{C,w}}{\nu_{C,i}} - \frac{M_{CO}}{M_C} \frac{H_{CO,w}}{\nu_{C,i}} \right] - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{M_{CO}}{M_C} \frac{H_{CO,w}}{\nu_{C,CO_2}} C_{CO_2,w} - \frac{M_{H_2}}{M_C} \frac{H_{H_2,w}}{\nu_{C,H_2O}} C_{H_2O,w} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (30)$$

Так, получено выражение для теплового потока  $\dot{q}_\lambda$  без использования энтальпии  $H_w$ .

Для альтернативного определения  $\frac{\alpha}{C_p} \sum_\xi \{C_{\xi,w}\} \times H_{\xi,w}$  в (30) используются соответствующие уравнения диффузии (10)–(12) и условия сохранения атомарных компонентов при реакциях в газовой фазе (4)–(6).

Предварительно получаем выражения, справедливые для приведенных [13] (универсальных [3, 16]) концентраций продуктов реакций (CO и H<sub>2</sub>). Для этого используются уравнения (11), (12) и условия (5), (6). Уравнение диффузии (12) применяется отдельно для  $j = 1$  и  $2$ , т.е. для CO и H<sub>2</sub>.

Отметим, что в уравнениях диффузии, записанных для приведенной концентрации, источник член отсутствует [3, 8, 13]. Поскольку уравнение диффузии в этом случае становится подобным уравнению энергии для полных энтальпий, то поля приведенных концентраций и полных энтальпий подобны [8, 13]

$$\frac{\bar{C}_j - \bar{C}_{j,w}}{\bar{C}_{j,e} - \bar{C}_{j,w}} = \frac{H - H_w}{H_e - H_w} = \bar{H}. \quad (31)$$

Из уравнений диффузии (12) для приведенных концентраций  $\bar{C}_{CO}$  ( $j = 1$ ) и  $\bar{C}_{H_2}$  ( $j = 2$ ), согласно (31), и с учетом условий на внешней границе пограничного слоя получены два следующих соотношения:

$$\frac{\bar{C}_{CO} - \bar{C}_{CO,w}}{\frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} C_{CO_2,e} - \bar{C}_{CO,w}} = \bar{H}, \quad (32)$$

$$\frac{\bar{C}_{H_2} - \bar{C}_{H_2,w}}{\frac{nM_{H_2}}{M_{H_2O}} C_{H_2O,e} - \bar{C}_{H_2,w}} = \bar{H}, \quad (33)$$

где для  $j = 1$   $\bar{C}_{CO} = C_{CO} + \frac{nM_{CO}}{M_v} C_v + \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} C_{CO_2}$ , для

$$j = 2 \quad \bar{C}_{H_2} = C_{H_2} + \frac{mM_{H_2}}{2M_v} C_v + \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} C_{H_2O}.$$

Дифференцируя (32) по  $\bar{H}$ , получаем

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial C_{CO}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{CO,w} + \frac{nM_{CO}}{M_v} \left[ \left( \frac{\partial C_v}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{v,w} \right] + \\ + \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} \left[ \left( \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{CO_2,w} - C_{CO_2,e} \right] = 0. \end{aligned} \quad (34)$$

Введем обозначения

$$\{C_{v,w}\} = \left( \frac{\partial C_v}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{v,w},$$

$$\{C_{CO,w}\} = \left( \frac{\partial C_{CO}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{CO,w},$$

$$\{C_{CO_2,w}\} = \left[ \left( \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{CO_2,w} - C_{CO_2,e} \right].$$

В принятых обозначениях (34) представляется как

$$\{C_{CO,w}\} = -\frac{nM_{CO}}{M_v} \{C_{v,w}\} - \frac{M_{CO}}{M_{CO_2}} \{C_{CO_2,w}\}. \quad (35)$$

Дифференцируя (33) по  $\bar{H}$ , получаем

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial C_{H_2}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{H_2,w} + \frac{mM_{H_2}}{2M_v} \left[ \left( \frac{\partial C_v}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{v,w} \right] + \\ + \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \left[ \left( \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{H_2O,w} - C_{H_2O,e} \right] = 0. \end{aligned} \quad (36)$$

Введем обозначения

$$\{C_{H_2,w}\} = \left( \frac{\partial C_{H_2}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{H_2,w},$$

$$\{C_{H_2O,w}\} = \left[ \left( \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial \bar{H}} \right)_w + C_{H_2O,w} - C_{H_2O,e} \right].$$

Теперь (36) представляется в форме

$$\{C_{H_2,w}\} = -\frac{mM_{H_2}}{2M_v} \{C_{v,w}\} - \frac{M_{H_2}}{M_{H_2O}} \{C_{H_2O,w}\}. \quad (37)$$

Согласно (4), связь между  $\{C_{i,w}\}$  и  $\{C_{v,w}\}$  используется в виде

$$\{C_{v,w}\} = \sum_i \frac{\{C_{i,w}\}}{\vartheta_{v,i}}. \quad (38)$$

Преобразуем выражение для теплосодержания газа в области поверхности:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{C_p} \sum_\xi \{C_{\xi,w}\} H_{\xi,w} = \\ = \frac{\alpha}{C_p} \left[ \sum_i \{C_{i,w}\} H_{i,w} + \{C_{v,w}\} H_{v,w} \right] + \\ + \frac{\alpha}{C_p} [\{C_{CO,w}\} H_{CO,w} + \{C_{H_2,w}\} H_{H_2,w}]. \end{aligned} \quad (39)$$

Подставляя (35), (37) и (38) в (39), получаем

$$\frac{\alpha}{C_p} \sum_{\xi} \{C_{\xi,w}\} H_{\xi,w} = \frac{\alpha}{C_p} \sum_i \frac{\{C_{i,w}\}}{\nu_{v,i}} \left[ H_{v,w} + \nu_{v,i} H_{i,w} - \frac{nM_{CO}}{M_v} H_{CO,w} - \frac{mM_{H_2}}{2M_v} H_{H_2,w} \right] - \frac{\alpha}{C_p} \times \left[ \frac{nM_{CO}}{M_v} \frac{H_{CO,w}}{\nu_{v,CO_2}} \{C_{CO_2,w}\} + \frac{nM_{H_2}}{M_v} \frac{H_{H_2,w}}{\nu_{v,H_2O}} \{C_{H_2O,w}\} \right]. \quad (40)$$

Подставляя (40) в (30), находим

$$\dot{q}_\lambda = \frac{\alpha}{C_p} (H_{e,e} - H_{e,w}) - \frac{\alpha}{C_p} \sum_i \frac{\{C_{i,w}\}}{\nu_{v,i}} \left[ H_{v,w} + \nu_{v,i} H_{i,w} - \frac{nM_{CO}}{M_v} H_{CO,w} - \frac{mM_{H_2}}{2M_v} H_{H_2,w} \right] - \frac{\alpha}{C_p} \times \left[ \frac{nM_{CO}}{M_v} \frac{H_{CO,w}}{\nu_{v,CO_2}} \{C_{CO_2,w}\} + \frac{nM_{H_2}}{M_v} \frac{H_{H_2,w}}{\nu_{v,H_2O}} \{C_{H_2O,w}\} \right] + Z_w \left\{ \sum_i \frac{C_{i,w}}{\nu_{C,i}} \left[ \nu_{C,i} H_{i,w} + H_{C,w} - \frac{M_{CO}}{M_C} H_{CO,w} \right] - \frac{M_{CO}}{M_C} \frac{H_{CO,w}}{\nu_{C,CO_2}} C_{CO_2,w} - \frac{M_{H_2}}{M_C} \frac{H_{H_2,w}}{\nu_{C,H_2O}} C_{H_2O,w} \right\}. \quad (41)$$

Введем обозначения для тепловых эффектов в (41):

$Q_{i,w}^v = \left[ H_{v,w} + \nu_{v,i} H_{i,w} - \frac{nM_{CO}}{M_v} H_{CO,w} - \frac{mM_{H_2}}{2M_v} H_{H_2,w} \right]$  – тепловой эффект гомогенных реакций с пиролизными газами (разность теплосодержаний исходных веществ и конечных продуктов);  $H_{v,w} + \nu_{v,i} H_{i,w}$  – сумма теплосодержаний активных пиролизных газов и расходуемых на их окисление компонентов;  $\frac{nM_{CO}}{M_v} H_{CO,w} + \frac{mM_{H_2}}{2M_v} H_{H_2,w}$  – теплосодержание продуктов реакции;  $Q_{i,w}^C = \left[ H_{C,w} + \nu_{C,i} H_{i,w} - \frac{M_{CO}}{M_C} H_{CO,w} \right]$  – тепловой эффект реакций с углеродом кокса – разность теплосодержаний начальных веществ и конечных продуктов;  $Q_{i,w}^v, Q_{i,w}^C$  – соответственно тепловые эффекты при реагировании единицы массы вдуваемого газа или единицы массы углерода прококсованного слоя ТЗП с соответствующими  $i$ -ми ( $CO_2$  и  $H_2O$ ) химически активными компонентами набегающего потока при  $T_w$ . Здесь  $\nu_{v,1}, \nu_{v,2}$  согласно (2).

В силу принятых обозначений соотношение (41) представляется в виде

$$\dot{q}_\lambda = \frac{\alpha}{C_p} (H_{e,e} - H_{e,w}) - \frac{\alpha}{C_p} \sum_i \frac{\{C_{i,w}\}}{\nu_{v,i}} Q_{i,w}^v - \frac{\alpha}{C_p} \frac{nM_{CO}}{M_v} \frac{H_{CO,w}}{\nu_{v,CO_2}} \{C_{CO_2,w}\} - \frac{\alpha}{C_p} \frac{nM_{H_2}}{M_v} \frac{H_{H_2,w}}{\nu_{v,H_2O}} \{C_{H_2O,w}\} + Z_w \times \left\{ \sum_i \frac{C_{i,w}}{\nu_{C,i}} Q_{i,w}^C - \frac{M_{CO}}{M_C} \frac{H_{CO,w}}{\nu_{C,CO_2}} C_{CO_2,w} - \frac{M_{H_2}}{M_C} \frac{H_{H_2,w}}{\nu_{C,H_2O}} C_{H_2O,w} \right\}. \quad (42)$$

Поскольку в приближении диффузионного режима справедливо

$$\left( \frac{\alpha}{C_p} \{C_{CO_2,w}\} - Z_w C_{CO_2,w} \right) = 0, \quad \left( \frac{\alpha}{C_p} \{C_{H_2O,w}\} - Z_w C_{H_2O,w} \right) = 0,$$

то уравнение (42) преобразуется в

$$\dot{q}_\lambda = \frac{\alpha}{C_p} (H_{e,e} - H_{e,w}) - \frac{\alpha}{C_p} \times \sum_i \frac{\{C_{i,w}\}}{\nu_{v,i}} Q_{i,w}^v + Z_w \sum_i \frac{C_{i,w}}{\nu_{C,i}} Q_{i,w}^C. \quad (43)$$

Используя (23), из (43) находим

$$\dot{q}_\lambda = \frac{\alpha}{C_p} \left[ H_{e,e} - H_{e,w} + \sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^v}{\nu_{v,i}} - \left( B + 1 + \frac{Z_w}{\alpha/C_p} \right) \sum_i \frac{C_{i,w} Q_{i,w}^v}{\nu_{v,i}} + \frac{Z_w}{\alpha/C_p} \sum_i \frac{C_{i,w} Q_{i,w}^C}{\nu_{C,i}} \right]. \quad (44)$$

Тогда, приравнявая правые части (44) и (22), получаем выражение для обобщенного коэффициента тепломассообмена в следующем виде:

$$\left( \frac{\alpha}{C_p} \right)_k = \frac{\alpha}{C_p} \left[ 1 + \frac{\sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^v}{\nu_{v,i}}}{H_{e,e} - H_{e,w}} - \frac{\left( 1 + B + \frac{Z_w}{\alpha/C_p} \right)}{H_{e,e} - H_{e,w}} \times \sum_i \frac{C_{i,w} Q_{i,w}^v}{\nu_{v,i}} + \frac{Z_w}{\alpha/C_p} \sum_i \frac{C_{i,w} Q_{i,w}^C}{\nu_{C,i}} \right]. \quad (45)$$

Из (44) следует, что влияние тепловых эффектов гомогенных реакций внутри пограничного слоя на тепловой поток в стенку  $\dot{q}_\lambda$  (т.е. внутрь ТЗП) эквивалентно учету теплоотдачи этих реакций, проходящих вблизи стенки (при  $T_w$ ), т.е. фактически на поверхности прококсованного слоя.

Таким образом, решение задачи тепломассообмена в пограничном слое с учетом химических реакций окислительных компонентов с пиролизным вдуваемым газом и с материалом стенки поз-

волило получить соотношения для обобщенного коэффициента тепломассообмена  $\left(\frac{\alpha}{C_p}\right)_k$  (45).

Зависимость (44) по существу является граничным условием при решении сложной сопряженной задачи теплопроводности для нестационарного прогрева и разрушения теплозащитных материалов с учетом процессов термической деструкции с подвижными внешней и внутренней границами (задача Стефана).

Далее рассмотрим два предельных случая определения обобщенного коэффициента тепломассообмена при наличии различных режимов химического реагирования продуктов нагревающего потока в пограничном слое.

### ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ОТСУТСТВИИ ГОМОГЕННЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Рассмотрим случай вдува в пограничный слой инертного газа, т.е. при отсутствии вдува активных компонентов из ТЗП. В этом случае окислительные компоненты из нагревающего потока реагируют только с углеродом прококсованного слоя и тепловые эффекты имеют место лишь на поверхности.

Из (23) следует соотношение, определяющее расход/потери окисляющих компонентов в пограничном слое, т.е. на реакции с активным вдуваемым газом:

$$\{C_{i,w}\} = C_{i,e} \left[ \frac{C_{i,w}}{C_{i,e}} \left( 1 + B + \frac{Z_w}{\alpha/C_p} \right) - 1 \right]. \quad (46)$$

При отсутствии химических реакций в пограничном слое  $\{C_{i,w}\} = 0$ , и тогда из (46) следует

$$\frac{C_{i,w}}{C_{i,e}} = \left( 1 + B + \frac{Z_w}{\alpha/C_p} \right)^{-1}. \quad (47)$$

Подстановка соотношения (47) в (44) позволяет получить для случая отсутствия реакций в пограничном слое  $\dot{q}_\lambda$  в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{q}_\lambda &= \frac{\alpha}{C_p} \times \\ &\times \left[ H_{e,e} - H_{e,w} + \frac{1}{1 + \frac{\alpha/C_p}{Z_w} (1 + B)} \sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^C}{v_{C,i}} \right] = \\ &= \frac{\alpha}{C_p} \left[ H_{e,e} - H_{e,w} + \frac{B_{m,C} P_{\Sigma,w}^C}{1 + \frac{\alpha/C_p}{Z_w} (1 + B)} \right], \quad (48) \\ P_{\Sigma,w}^C &= \frac{\sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^C}{v_{C,i}}}{\sum_i \frac{C_{i,e}}{v_{C,i}}} = \frac{\sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^C}{v_{C,i}}}{B_{m,C}} = \frac{Q_\Sigma^C}{B_{m,C}}. \end{aligned}$$

Здесь  $P_{\Sigma,w}^C$  – суммарный тепловой эффект реакции материала стенки со всеми окислительными компонентами (при  $T_w$ );  $B_{m,C} = \sum_i \frac{C_{i,e}}{v_{C,i}}$  – окислительный потенциал в реакции  $i$ -х окислительных компонентов с углеродом коксового остатка;  $Q_\Sigma^C$  – суммарное количество тепла, выделяемого (поглощаемого) при диффузионном режиме реагирования для гетерогенных реакций.

Из (48) делением на разность энтальпий определяется обобщенный коэффициент тепломассообмена, учитывающий реакции в пограничном слое:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\alpha}{C_p}\right)_k &= \\ &= \frac{\alpha}{C_p} \left\{ 1 + \frac{B_{m,C} P_{\Sigma,w}^C}{\left[ 1 + \frac{\alpha/C_p}{Z_m} (1 + B) \right] (H_{e,e} - H_{e,w})} \right\} = \quad (49) \\ &= \frac{\alpha}{C_p} \left\{ 1 + \frac{Q_\Sigma^C}{\left[ 1 + \frac{\alpha/C_p}{Z_m} (1 + B) \right] (H_{e,e} - H_{e,w})} \right\}. \end{aligned}$$

В случае если осуществляется диффузионный режим разрушения материала стенки  $\left(\frac{\alpha/C_p}{Z_m} \rightarrow 0\right)$ , то, согласно (49), получаем

$$\begin{aligned} \dot{q}_\lambda &= \frac{\alpha}{C_p} [H_{e,e} - H_{e,w} + B_{m,C} P_{\Sigma,w}^C] = \\ &= \frac{\alpha}{C_p} [H_{e,e} - H_{e,w} + Q_\Sigma^C], \end{aligned}$$

а обобщенный коэффициент тепломассообмена (при отсутствии гомогенных химических реакций в пограничном слое) имеет вид

$$\begin{aligned} \left(\frac{\alpha}{C_p}\right)_k &= \frac{\alpha}{C_p} \left[ 1 + \frac{B_{m,C} P_{\Sigma,w}^C}{H_{e,e} - H_{e,w}} \right] = \\ &= \frac{\alpha}{C_p} \left[ 1 + \frac{Q_\Sigma^C}{H_{e,e} - H_{e,w}} \right] = \frac{\alpha}{C_p} K_{Q_C}. \quad (50) \end{aligned}$$

Отметим, в [7, 9] также показано, что тепловой поток в стенку при наличии химических реакций в пограничном слое определяется отношением теплового эффекта к перепаду энтальпий по толщине пограничного слоя.

### ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ НАЛИЧИИ ГОМОГЕННЫХ РЕАКЦИЙ С ПОЛНЫМ РАСХОДОВАНИЕМ ОКИСЛЯЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

Если все окисляющие компоненты расходуются в процессе гомогенных реакций, то тепловой поток  $q_\lambda$  при диффузионном режиме реагирования вдуваемых газов с активными продуктами от



разложения ТЗП определяется с учетом  $C_{i,w} = 0$  [6]. Реагирование с углеродом кокса отсутствует, и тепловые эффекты имеют место только внутри пограничного слоя. Из уравнения (44) получаем

$$\begin{aligned} \dot{q}_\lambda &= \frac{\alpha}{C_p} \left( H_{e,e} - H_{e,w} + \sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^v}{v_{v,i}} \right) = \\ &= \frac{\alpha}{C_p} \left( H_{e,e} - H_{e,w} + B_{m,v} P_{\Sigma,w}^v \right), \\ P_{\Sigma,w}^v &= \frac{\sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^v}{v_{v,i}}}{\sum_i \frac{C_{i,e}}{v_{v,i}}} = \frac{\sum_i \frac{C_{i,e} Q_{i,w}^v}{v_{v,i}}}{B_{m,v}} = \frac{Q_\Sigma^v}{B_{m,v}}, \end{aligned}$$

где  $P_{\Sigma,w}^v$  – суммарный тепловой эффект реакций химически активных вдуваемых газов со всеми окислительными компонентами при  $T_w$ ;  $Q_\Sigma^v$  – количество тепла, выделяемого (поглощаемого) при диффузионном режиме реагирования для гомогенных реакций.

В данном случае суммарный коэффициент тепломассообмена выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} \left( \frac{\alpha}{C_p} \right)_k &= \frac{\alpha}{C_p} \left[ 1 + \frac{B_{m,v} P_{\Sigma,w}^v}{H_{e,e} - H_{e,w}} \right] = \\ &= \frac{\alpha}{C_p} \left[ 1 + \frac{Q_\Sigma^v}{H_{e,e} - H_{e,w}} \right] = \frac{\alpha}{C_p} K_Q, \end{aligned} \tag{51}$$

Соотношения (50), (51) отличаются между собой лишь тепловыми эффектами и окислительными потенциалами соответственно для гомогенных и гетерогенных реакций. Идентичность зависимостей в предельных случаях подтверждает вывод, что влияние тепловых эффектов внутри пограничного слоя идентично влиянию на границе теплозащитного покрытия (поверхности кокса).

### РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ОБОБЩЕННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОМАСОБМЕНА

Коэффициенты  $K_Q$ , определяющие влияние тепловых эффектов в пограничном слое на обобщенный коэффициент тепломассообмена, вычисляются согласно (50), (51). Оценки  $K_Q$  проведены для вдуваемого пиролизного газа, состоящего из  $\text{CH}_4$ . Окислительный потенциал для пиролизного газа оценивается величиной  $B_{m,v} = 0.0952$ , окислительный потенциал для углерода коксового остатка оценен  $B_{m,c} = 0.0713$  [6].

Учитывая, что теплоемкость продуктов нагревающего потока (продуктов сгорания твердых топлив) составляет  $C_p$  от 1.7 до 4 кДж/(кг К) [10], для оценок принято  $C_p = 2.0$  кДж/(кг К),  $\Delta H = C_p \Delta T$ .

Возможный перепад температур по толщине пограничного слоя при такой удельной теплоемкости лежит в диапазоне 250–2000 К.

Результаты расчетов  $K_Q$  представлены на рис. 3, 4.

Максимальный перепад температур (и энтальпий) по толщине пограничного слоя наблюдается в начальные моменты времени прогрева теплозащитного покрытия [2]. В этом случае вдувается максимальное количество активных пиролизных газов [5]. Окислительные компоненты из нагревающего потока практически полностью расходуются в пограничном слое, а потери тепла в силу гомогенных эндотермических реакций максимальны [6]. В рассматриваемом случае поправочный коэффициент  $K_Q$  лежит в диапазоне от 0.6 до 0.9 (рис. 4).

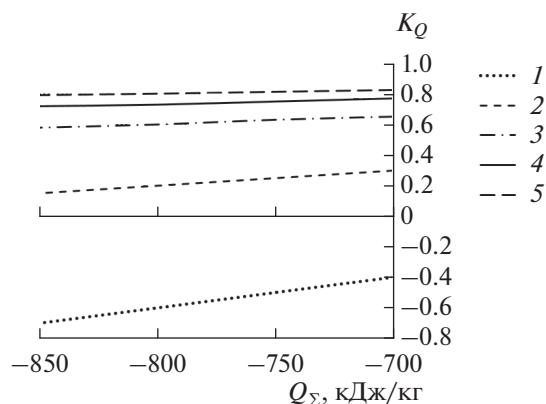


Рис. 3. Зависимости поправочного коэффициента  $K_Q$  от величины теплового эффекта  $Q_\Sigma$  для различных перепадов энтальпий по толщине пограничного слоя: 1 –  $\Delta H = 500$  кДж/кг, 2 – 1000, 3 – 2000, 4 – 3000, 5 – 4000.

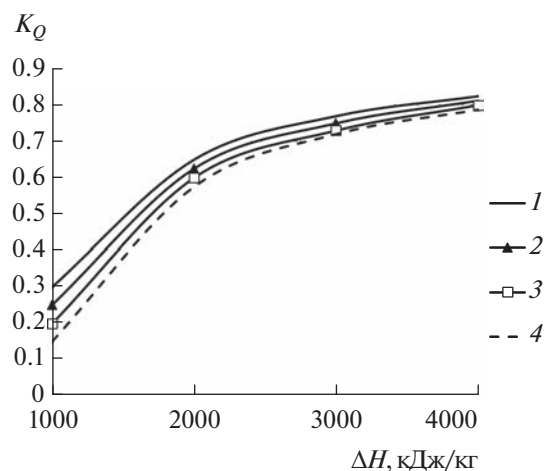


Рис. 4. Зависимости поправочного коэффициента  $K_Q$  от перепада энтальпий  $\Delta H$  по толщине пограничного слоя для различных величин теплового эффекта:  $Q_\Sigma = -700$  кДж/кг (1),  $-750$  (2),  $-800$  (3),  $-850$  (4).

По мере прогрева теплозащитного покрытия температура поверхности повышается и, соответственно, перепад температур и энтальпий по толщине пограничного слоя падает. Поправочный коэффициент почти линейно уменьшается (рис. 4) от 0.6 до ~0.2 (~40%), что удовлетворительно согласуется с результатами оценок в [4] (от –5% до 50%). В этот период влияние тепловых эффектов в пограничном слое на коэффициент теплообмена наиболее существенно.

Самое сильное влияние тепловых эффектов на коэффициент теплообмена (вплоть до отрицательных значений поправочного коэффициента и, следовательно, отрицательного теплового потока – поток от стенки) наблюдается при длительном прогреве теплозащитного покрытия, т.е. при небольших перепадах энтальпий по толщине пограничного слоя (рис. 3). Нужно только иметь в виду, что тогда расход вдуваемых активных газов (от поверхности прококсованного слоя) минимален и, следовательно, минимален и тепловой эффект от гомогенных реакций. Тепловой эффект от гетерогенных реакций приближается к максимуму.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод, выполнены оценки и показано существенное влияние тепловых эффектов химических реакций в пограничном слое на обобщенный коэффициент теплообмена.

Установлено, что влияние на обобщенный коэффициент теплообмена тепловых эффектов от гомогенных эндотермических реакций в пограничном слое идентично влиянию тепловых эффектов гетерогенных реакций на поверхности теплозащитного покрытия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками / Под ред. Зуева В.С. М.: Машиностроение, 1975. 224 с.
2. Губертов А.М., Миронов В.В., Борисов Д.М. и др. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / Под ред. Коротеева А.С. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.
3. Волчков Э.П., Терехов В.И., Терехов В.В. Структура течения, тепло- и массоперенос в пограничных слоях со вдувом химически реагирующих веществ (обзор) // ФГВ. 2004. Т. 40. № 1. С. 3.
4. Frank G., Pfitzner M. Investigation of the Heat Transfer Coefficient in a Transpiration Film Cooling with Chemical Reactions // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 113. P. 755.
5. Миронов В.В., Толкач М.А. Состав и свойства газобразных продуктов деструкции резиноподобной теплозащиты // ТВТ. 2021. Т. 59. № 5. С. 747.
6. Миронов В.В., Толкач М.А., Тлевцев В.В. Тепловые эффекты и влияние гомогенных реакций в пограничном слое на гетерогенные реакции с углеродом прококсованного слоя теплозащитного покрытия // ТВТ. 2022. Т. 60. № 6. С. 880.
7. Lees L. Convective Heat Transfer with Mass Addition and Chemical Reactions. In: Combustion and Propulsion. 3rd AGARD Colloquium. N.Y.: Pergamon Press, 1958.
8. Leontiev A., Saveliev A., Kichatov B., Kiverin A., Korshunov A., Sudakov V. Effect of Gaseous Coolant Temperature on the Transpiration Cooling for Porous Wall in the Supersonic Flow // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 142. P. 118433.
9. Газодинамика и теплообмен при наличии химических реакций: Сб. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 552 с.
10. Шишков А.А., Панин С.Д., Румянцев Б.В. Рабочие процессы в ракетных двигателях на твердом топливе. Спр. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.
11. Linan A. The Asymptotic Structure of Counter Flow Diffusion Flames for Large Activation Energy // Acta Astronautica. 1974. V. 1. P. 1007.
12. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита / Под ред. Лыкова А.В. М.: Энергия, 1976. 392 с.
13. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 240 с.
14. Жуков В.Т., Рыков Ю.Г., Феодоритова О.Б. Математическая модель течения многокомпонентной смеси газов с учетом возможности возникновения жидкой фазы. Препринт № 183. М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2018. 36 с.
15. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М. Конвективный теплоперенос и теплообмен. Учеб. пособ. Томск: СГТУ, 2017. 80 с.
16. Burke S.P., Schuman T.E. Diffusion Flames // Int. Eng. Chem. 1928. V. 20. № 10. P. 998.