

О ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ С ОХЛАЖДАЕМОЙ СТЕНКОЙ*

И. В. Семенов¹, Д. А. Сидоренко², С. М. Фролов³

Аннотация: Разработана физико-математическая модель, описывающая тепло- и массообмен при взаимодействии конденсированных продуктов сгорания ракетного двигателя на твердом топливе (РДТТ) с охлаждаемой стенкой. Модель учитывает образование пленки из конденсированных продуктов сгорания на стенке и изменение теплового потока в стенку в зависимости от состояния пленки. Пленка может состоять либо из твердого слоя, либо из твердого и жидкого слоев, при этом модель позволяет учитывать динамическое изменение толщин обоих слоев и профиля температуры внутри них. Разработаны две модификации модели. В первой — профиль температуры принят линейным в твердом и жидком слоях, во второй — профиль температуры линейный в твердом слое и параболический в жидком. Проведена серия расчетов с использованием разработанной модели и модели, основанной на численном решении методом конечного объема модифицированной задачи Стефана с заданными как стационарными, так и нестационарными потоками массы и тепла на одной из границ области и температуры на другой. Результаты расчетов показали хорошее соответствие динамики изменения температуры поверхности пленки и тепловых потоков в стенку и на поверхности пленки.

Ключевые слова: тепло- и массообмен; задача Стефана; двухфазная пленка; течение продуктов сгорания РДТТ; охлаждаемая поверхность; оксид алюминия; теоретическая модель

Введение

Во время старта работы РДТТ с высоким содержанием металла в заряде высокоскоростная струя продуктов сгорания, состоящая из газов и жидких металлических частиц, может кратковременно взаимодействовать с различными поверхностями.

* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 13-01-12072 ОФИ-м и 15-08-00782).

¹Институт автоматизации проектирования Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, semenov@icad.org.ru

²Институт автоматизации проектирования Российской академии наук; Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук, sidr1234@mail.ru

³Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

Такая ситуация может возникать, например, при пуске ракеты из контейнера. При разработке подобных устройств необходимо учитывать существенное изменение характера теплообмена между продуктами сгорания РДТТ и поверхностью, вызванное образованием пленки из конденсированных продуктов сгорания. Так, для твердых топлив на основе алюминия пленка будет состоять, в основном, из оксида алюминия. При этом в зависимости от расхода продуктов сгорания, температуры частиц, скорости их столкновения с поверхностью и скорости теплоотвода от поверхности пленка может состоять только из одного слоя затвердевших продуктов сгорания или из двух слоев — твердого и жидкого. Целью данной работы является разработка одномерной модели образования двухфазной пленки из конденсированных продуктов сгорания РДТТ на стенке с заданным законом изменения температуры ее поверхности и расчет с помощью модели тепловых потоков на стенке и на поверхности пленки, а также профиля температуры в пленке. Рассматриваемая задача является модификацией известной задачи Стефана, однако в отличие от классической постановки с одной подвижной внутренней границей, на которой происходит фазовый переход, в рассматриваемой постановке добавляется еще одна подвижная граница области, на которой задается поток массы и тепла [1, 2]. В данной модели не учитывается подвижность жидкого слоя пленки, однако в ходе дальнейших исследований и доработки модели данный процесс возможно будет учесть.

Для проверки разработанной модели использовали модель, основанную на численном решении модифицированной задачи Стефана с заданными потоками массы и тепла на одной из границ и постоянной температурой на другой [3]. Модель из [3] была нами доработана, для того чтобы можно было задавать переменную температуру стенки и переменные потоки массы и тепла на поверхности пленки. Модель основана на численном решении уравнения теплопроводности методом контрольного объема с явным выделением межфазной границы внутри области с помощью лагранжева подхода с учетом перемещения внешней границы области вследствие заданного потока массы. Проведена серия расчетов с использованием разработанной модели и модифицированной модели из [3].

Модель 1

Для построения первого варианта двухфазной модели пленки будем предполагать, что профиль температуры в твердом и жидком слоях пленки линейный. Используя законы сохранения энергии и массы пленки, а также учитывая условие Стефана для тепловых потоков на границе жидкого и твердого слоев пленки, получим следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\dot{m}_m = \dot{m}_f - \dot{m}_c; \quad (1)$$

$$\dot{m}_c = \frac{\rho A_w^2}{L_f} \left(\lambda_c \frac{T_c - T_w}{m_c} - \lambda_m \frac{T_s - T_c}{m_m} \right); \quad (2)$$

$$m_m \frac{C_m}{2} \dot{T}_s + C_m \frac{T_s + T_c}{2} \dot{m}_m + m_c \frac{C_c}{2} \dot{T}_w + C_c \frac{T_c + T_w}{2} \dot{m}_c =$$

$$= \dot{E} + \dot{m}_c L_f + \dot{H}_g A_w - \dot{H}_w A_w; \quad (3)$$

$$m_m(0) = m_{m0}; \quad m_c(0) = m_{c0}; \quad T_s(0) = T_{s0}; \quad t \in [\tau_0, \tau]. \quad (4)$$

Здесь t — время; m_f — полная масса пленки; T_s — температура поверхности пленки; T_w и \dot{T}_w — температура стенки и ее производная, которые считаются известными функциями времени; T_c — температура плавления вещества пленки; \dot{m}_f — масса частиц, в единицу времени падающих на поверхность пленки; $\dot{E} = \dot{m}_f (v_p^2/2 + C_m T_p)$ — полная энергия частиц, в единицу времени попадающая на поверхность пленки, где v_p и T_p — скорость и температура частиц; C_c , C_m , L_f , λ_c , λ_m и ρ — удельные теплоемкости твердого и жидкого слоев пленки, скрытая теплота кристаллизации, коэффициенты теплопроводности твердого и жидкого слоев пленки и плотность вещества пленки константы, не зависящие от температуры; A_w — площадь поверхности пленки; \dot{H}_g — тепловой поток из газа к пленке; \dot{H}_w — тепловой поток из пленки в стенку $\dot{H}_w = \lambda_c(T_c - T_w)/h_c = \rho A_w \lambda_c(T_c - T_w)/m_c$. В начальный момент времени τ_0 масса твердого слоя пленки равняется m_{c0} , жидкого слоя m_{m0} и температура поверхности пленки T_{s0} . Интегрируя систему (1)–(4) с помощью неявного метода Эйлера, находим массы твердого m_c и жидкого m_m слоев пленки, по ним определяем текущие толщины твердого и жидкого слоев пленки:

$$h_c = \frac{m_c}{\rho A_w}; \quad h_m = \frac{m_m}{\rho A_w}; \quad h_f = h_c + h_m.$$

В начальный момент образования пленки предполагается, что тепловой поток в стенку достаточно большой и пленка полностью кристаллизуется. При этом система (1)–(4) сокращается до одного уравнения для температуры поверхности пленки и записывается в виде:

$$m_c \frac{C_c}{2} \dot{T}_s + m_c \frac{C_c}{2} \dot{T}_w + C_c \frac{T_s + T_w}{2} \dot{m}_c = \dot{E} + \dot{m}_c L_f + \dot{H}_g A_w - \rho A_w^2 \lambda_c \frac{T_s - T_w}{m_c}; \quad (5)$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_f; \quad m_c(0) = m_{c0}; \quad T_s(0) = T_{s0}; \quad t \in [\tau_0, \tau].$$

Уравнение (5) интегрируется до момента времени пока $T_s < T_c$, после этого пленка считается двухфазной и далее интегрируется система (1)–(4). Предусмотрен также и обратный переход: если весь жидкий слой пленки кристаллизуется, далее интегрируется уравнение (5).

Модель 2

Одним из недостатков первого варианта модели является постоянная величина теплового потока по толщине твердого и жидкого слоев пленки. В общем случае, она разная в каждом слое. Однако для жидкого слоя пленки величины теплового

потока на границе с твердым слоем и на поверхности пленки могут существенно различаться. Чтобы учесть данное обстоятельство, был разработан второй вариант двухфазной модели пленки. Будем предполагать, что профиль температуры в твердом слое пленки линейный, а в жидком слое — параболический, тогда профиль температуры можно записать в виде:

$$T(y, t) = \begin{cases} A(t)y + B(t), & 0 \leq y \leq h_c(t); \\ C(t)(y - h_c(t))^2 + D(t)(y - h_c(t)) + G(t), & h_c(t) < y \leq h_f(t). \end{cases}$$

Используем следующие условия для нахождения функций $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$ и $G(t)$:

$$\left. \begin{aligned} T(0, t) = T_w(t); \quad T(h_c(t), t)_c = T_c; \quad T(h_c(t), t)_m = T_c; \quad T(h_f(t), t) = T_s(t); \\ -\lambda_c \left(\frac{\partial T(h_c(t), t)}{\partial y} \right)_c + \lambda_m \left(\frac{\partial T(h_c(t), t)}{\partial y} \right)_m = -\rho L_f \dot{h}_c(t). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Используя (6) имеем:

$$\begin{aligned} B(t) = T_w(t); \quad A(t) = \frac{T_c - T_w(t)}{h_c(t)}; \quad D(t) = \frac{A(t)\lambda_c}{\lambda_m} - \frac{\rho L_f \dot{h}_c(t)}{\lambda_m}; \\ G(t) = T_c; \quad C(t) = \frac{1}{h_m^2(t)} (T_s(t) - D(t)h_m(t) - T_c). \end{aligned}$$

Итоговая система уравнений будет содержать в себе закон сохранения энергии для пленки и условие неразрывности потока энергии на свободной границе. Дополнительно будем считать плотность, теплоемкость и теплопроводность не зависящими от температуры: $\rho(T(y, t)) = \rho$; $c(T(y, t)) = c$; $\lambda(T(y, t)) = \lambda$. Здесь и далее опустим обозначение зависимости переменных от времени. Итоговая система запишется в виде:

$$\begin{aligned} c\rho A_w \left(\dot{A} \frac{h_c^2}{2} + A \dot{h}_c h_c + \dot{B} h_c + B \dot{h}_c + \dot{C} \frac{h_m^3}{3} + C \dot{h}_m h_m^2 + \dot{D} \frac{h_m^2}{2} + \right. \\ \left. + D \dot{h}_m h_m + \dot{G} h_m + G \dot{h}_m \right) = \dot{E} + \rho A_w \dot{h}_c L_f + \dot{H}_g A_w - \dot{H}_w A_w; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\lambda (2Ch_m + D) A_w = \dot{H}_p A_w + \dot{H}_g A_w; \quad (8)$$

$$h_c(\tau_0) = h_{c0}; \quad h_m(\tau_0) = h_{m0}; \quad T(h_f(\tau_0), \tau_0) = T_s(\tau_0) = T_{s0}; \quad t \in [\tau_0, \tau]. \quad (9)$$

Здесь обозначения аналогичны обозначениям для модели 1. Для определения в уравнении (8) потока тепла от частиц на поверхность пленки использовали следующее выражение:

$$\dot{H}_p A_w = \dot{m}_f \left(\frac{v_p^2}{2} + c(T_p - T_s) \right).$$

Для упрощения введем коэффициенты:

$$Z = \frac{\dot{H}_p + \dot{H}_g}{\lambda}; \quad Y = \frac{\rho L_f}{\lambda}; \quad X = T_c - T_w; \quad V = \frac{\ddot{H}_p + \ddot{H}_g}{\lambda}.$$

Из уравнения (8) получим следующие выражения для T_s и \dot{T}_s :

$$\left. \begin{aligned} T_s &= \frac{Z}{2} h_m + \frac{X}{2} \frac{h_m}{h_c} - \frac{Y}{2} h_m \dot{h}_c + T_c; \\ \dot{T}_s &= \frac{Z}{2} \dot{h}_m + \frac{V}{2} h_m + \frac{X}{2} \frac{\dot{h}_m}{h_c} - \frac{X}{2} \frac{h_m \dot{h}_c}{h_c^2} - \frac{\dot{T}_w}{2} \frac{h_m}{h_c} - \frac{Y}{2} \dot{h}_m \dot{h}_c - \frac{Y}{2} h_m \ddot{h}_c. \end{aligned} \right\} (10)$$

Подставляя выражения для T_s и \dot{T}_s в уравнение (7), получим обыкновенное дифференциальное уравнение (ОДУ) второго порядка относительно h_c . Опуская выкладки, имеем:

$$\ddot{h}_c = \frac{2\dot{h}_c^2 - \dot{h}_c(Z/Y + 2\dot{h}_f)}{h_f - h_c} + \frac{K_{h_c} \dot{h}_c + (\dot{h}_c/h_c^2)(-Xh_f^2) + h_c^2 V/2 + K_{h_c} h_c + K_{h_c^{-1}}/h_c + K}{Y(h_f - h_c)^2},$$

$$h_c(\tau_0) = h_{c0}, \quad \dot{h}_c(\tau_0) = \dot{h}_{c0}, \quad (11)$$

где

$$K_{h_c} = -\frac{X}{2} - 3\frac{L_f}{c}; \quad K_{h_c} = -Z\dot{h}_f - Vh_f + \frac{\dot{T}_w}{2}; \quad K_{h_c^{-1}} = 2X\dot{h}_f h_f - \dot{T}_w h_f^2 + 3\frac{\lambda X}{c\rho};$$

$$K = Z\dot{h}_f h_f - 2X\dot{h}_f + \frac{V}{2} h_f^2 + 2\dot{T}_w h_f + 3T_c \dot{h}_f - 3\frac{\dot{E} + \dot{H}_g A_w}{c\rho A_w}.$$

Начальное условие для \dot{h}_{c0} из (11) получаем из (10) и начальных условий из (9):

$$\dot{h}_{c0} = \frac{Z(\tau_0)}{Y(\tau_0)} + \frac{X(\tau_0)}{Y(\tau_0)} \frac{1}{h_{c0}} - \frac{2(T_{s0} - T_c)}{Y(\tau_0)(h_f(\tau_0) - h_{c0})}.$$

Уравнение (11) интегрируем как систему двух уравнений первого порядка с помощью неявного метода Эйлера.

Результаты расчетов

В качестве первой тестовой задачи для разработанных моделей рассмотрели задачу об образовании пленки из оксида алюминия на охлаждаемой стенке с постоянной температурой 373 К. Поток частиц оксида алюминия задавали равным 5 кг/(м²с), скорость частиц при столкновении со стенкой 2000 м/с, температура

частиц 3000 К. Тепловой поток из газа в данном тесте не учитывали. Для оксида алюминия задавали следующие параметры: плотность 4000 кг/м^3 ; удельная теплоемкость 1310 Дж/кг/К ; коэффициент теплопроводности $4,07 \text{ Вт/м/К}$; температура плавления 2327 К ; теплота плавления $1,07 \text{ МДж/кг}$. Данные взяты из справочников [4, 5]. На рис. 1 представлено сравнение зависимости температуры поверхности пленки от времени, полученной по моделям 1, 2 и модели из [3]. Хорошо видно, что на начальной стадии вплоть до $0,3 \text{ с}$ (момента появления жидкого слоя) температура поверхности пленки предсказывается всеми моделями практически одинаково.

Однако при переходе пленки в двухфазное состояние модель 1 начинает завышать температуру поверхности, что вызвано требованием линейности профиля температуры в жидком слое. Модель 2 дает температуру поверхности пленки, близкую к температуре, полученной по модели из [3]. Разница в температуре поверхности пленки между двумя моделями не превышает 100 К на момент времени 1 с . Следует отметить, что при расчете по модели из [3] теплофизические свойства частиц также задавались постоянными. Далее будем ссылаться на модель из [3] как на полную модель.

На рис. 2, *а* представлены профили температуры по толщине пленки, полученные по трем моделям, а на рис. 2, *б* — профили теплового потока по толщине пленки. Можно видеть, что при росте толщины жидкого слоя и соответственно температуры поверхности пленки различия между результатами по моделям 1, 2 и полной модели начинают нарастать. При этом профиль температуры по модели 2 лучше согласуется с профилем температуры по полной модели. Тем не менее, положение межфазной границы и тепловой поток на стенке всеми моделями предсказываются очень близкими вплоть до момента времени 1 с . Из рис. 2, *б* видно, что при увеличении толщины жидкого слоя, в сравнении с результатами по полной модели, модель 1 лучше предсказывает положение межфазной границы, чем модель 2, но при этом модель 2 точнее предсказывает тепловые потоки на стенке и на поверхности пленки.

Во второй тестовой задаче задавали на поверхности пленки переменный поток жидких капель оксида алюминия, линейно уменьшающийся от $10 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$ до 0 за 1 с . Далее этот поток полагали равным нулю. Все остальные параметры соответствовали параметрам первой задачи. На рис. 3 представлена динамика изменения температуры поверхности пленки, рассчитанная с использованием моделей 1, 2

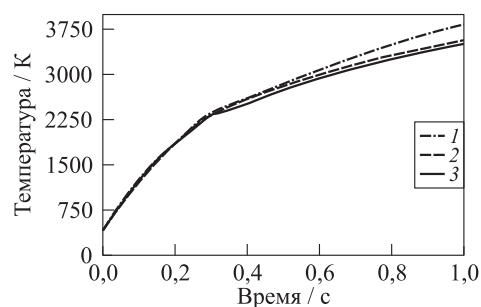
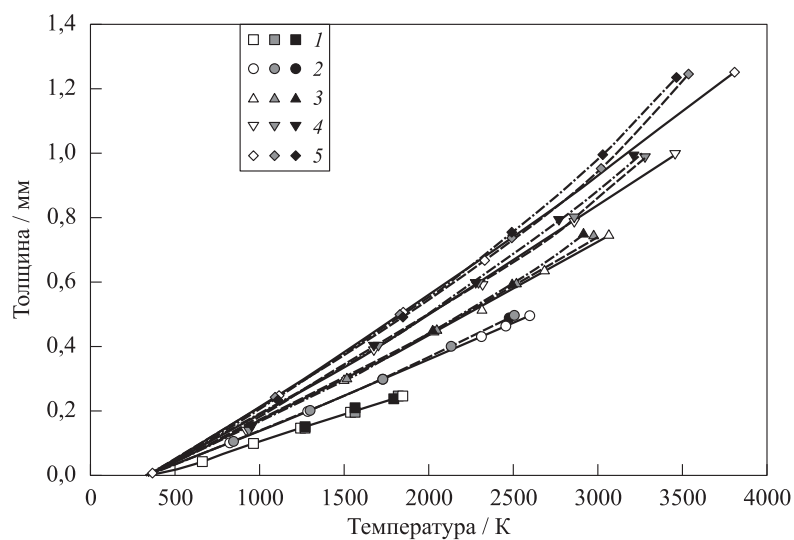
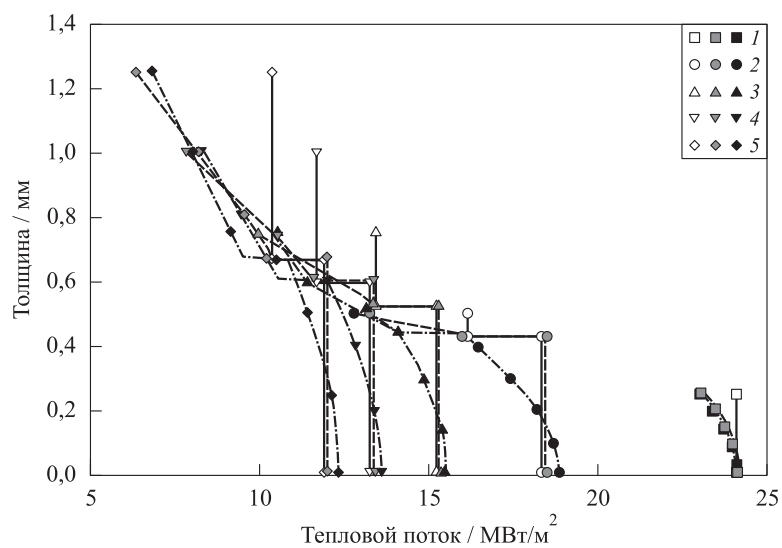


Рис. 1 Зависимость температуры поверхности пленки от времени: 1 — результаты расчета по модели 1; 2 — результаты расчета по модели 2; 3 — результаты расчета по модели из [3]



(а)



(б)

Рис. 2 Профили температуры (а) и теплового потока (б) по толщине пленки в различные моменты времени: 1 — 0,2 с; 2 — 0,4; 3 — 0,6; 4 — 0,8; 5 — 1,0 с. Пустые значки — результаты расчета по модели 1; серые значки — результаты расчета по модели 2; черные значки — результаты расчета по модели из [3]

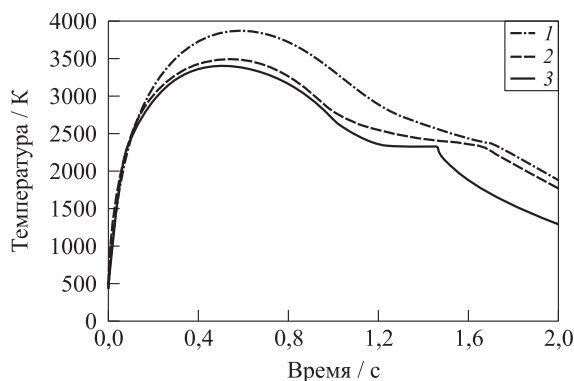


Рис. 3 Зависимость температуры поверхности пленки от времени для задачи с переменным потоком массы: 1 — результаты расчета по модели 1; 2 — результаты расчета по модели 2; 3 — результаты расчета по модифицированной модели из [3]

и модифицированной модели из [3]. Модель из [3] была авторами настоящей статьи доработана, так как оригинальная модель могла применяться только для случая постоянных потоков массы и тепла на поверхности пленки. Вплоть до момента образования жидкого слоя пленки, который соответствует времени расчета 0,1 с, все три модели предсказывают практически одинаковую температуру поверхности пленки. После образования жидкого слоя модель 1, как и в первой задаче, показывает завышенную температуру поверхности пленки, при этом модель 2 и модифицированная модель из [3] продолжают показывать близкие температуры вплоть до момента времени 1 с, соответствующего отключению потока частиц на поверхность пленки. Модели 1 и 2 предсказывают более позднее время застывания жидкого слоя пленки (1,75 и 1,7 с соответственно), чем модифицированная модель из [3], которая дает время застывания 1,45 с.

На рис. 4 представлены распределения температуры по толщине пленки для пяти характерных моментов времени, полученные по трем моделям. Стоит отметить, что после затвердевания жидкого слоя модели 1 и 2 переходят на однофазную модель пленки с линейным профилем температуры, что не позволяет им удовлетворить условию адиабатичности на поверхности пленки в отличие от модели из [3]. Тем не менее, тепловой поток в стенку, вплоть до момента времени 2 с, продолжает предсказываться всеми моделями практически одинаково (см. рис. 4, б).

Заключение

Разработаны два варианта физико-математической модели, описывающей тепло- и массообмен при взаимодействии продуктов сгорания РДТТ и охлаждаемой стенки с образованием нестационарной двухфазной пленки. Проведена

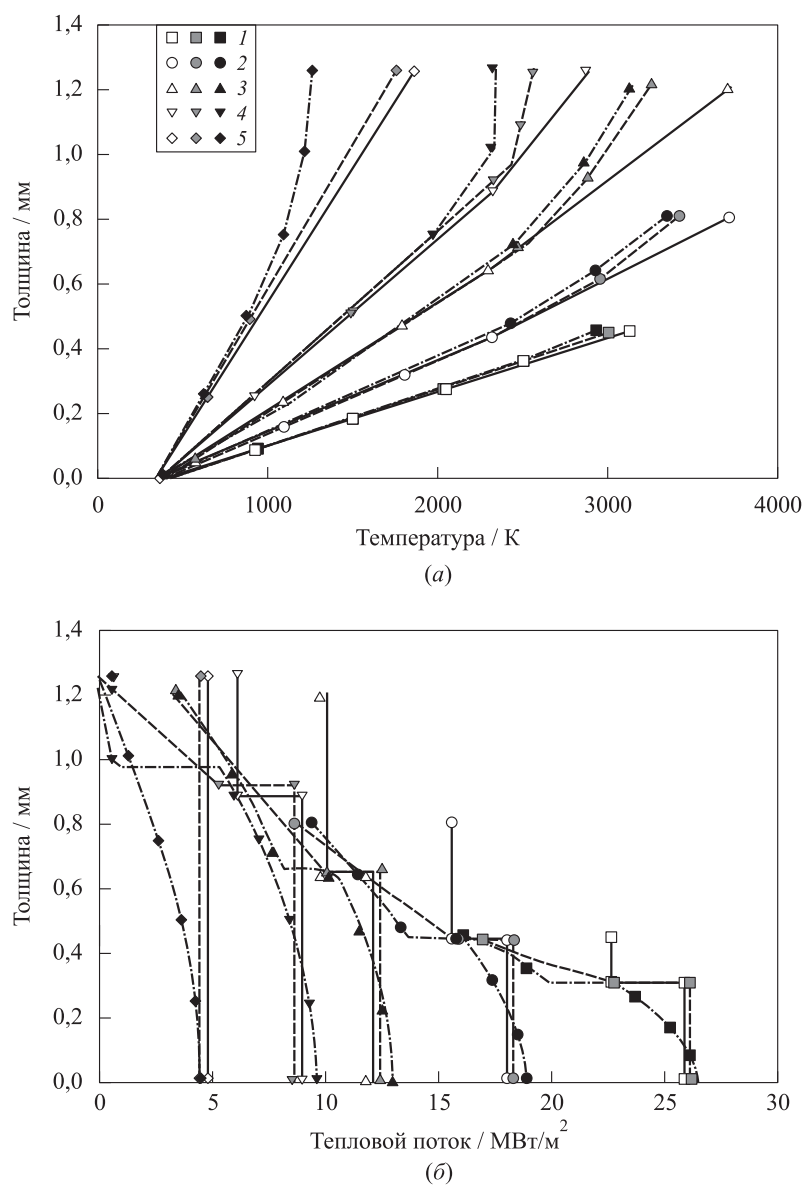


Рис. 4 Профили температуры (а) и теплового потока (б) по толщине пленки в различные моменты времени для задачи с переменным потоком массы: 1 — 0,2 с; 2 — 0,4; 3 — 0,8; 4 — 1,2; 5 — 2,0 с. Пустые значки — результаты расчета по модели 1; серые значки — результаты расчета по модели 2; черные значки — результаты расчета по модели из [3]

серия расчетов с использованием разработанной модели и модели, основанной на численном решении методом конечного объема модифицированной задачи Стефана с заданными потоками массы и тепла на одной из границ и температурой на другой. Результаты расчетов показали хорошее соответствие динамики изменения температуры поверхности пленки и тепловых потоков в стенку и на поверхность пленки по всем трем моделям. При этом вариант модели, предполагающий линейный профиль температуры в твердом слое и параболический профиль температуры в жидком, дает более близкие величины тепловых потоков на поверхности пленки и на стенке, а также температуры поверхности пленки по сравнению с моделью [3], чем вариант модели с линейным профилем температуры в твердом и жидком слоях. Продемонстрирована работоспособность модели в случае переменного расхода массы на поверхности пленки с образованием жидкого слоя и полной его кристаллизацией. Модель также позволяет проводить расчеты теплового состояния пленки с изменяющейся по времени температурой стенки. Разработанная модель может быть использована в пакетах прикладных программ для расчета двухфазных течений продуктов сгорания РДТТ и их взаимодействия с охлаждаемыми стенками, в том числе в соплах РДТТ. В дальнейшем планируется включить в модель учет подвижности жидкого слоя пленки.

Литература

1. Yao L. S., Prusa J. Melting and freezing // Adv. Heat Transfer, 1989. Vol. 19. P. 1–95.
2. Rizwan-Uddin. An approximate-solution-based numerical scheme for Stefan problem with time-dependent boundary conditions // Numerical Heat Transfer B, 1998. Vol. 33. No. 3. P. 269–285.
3. Thirunavukarasu B. A. Study of solidification dynamics with liquid mass influx. Oregon State University, 2003. Thesis. 117 p.
4. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972. 294 с.
5. Маурах М. А., Митин Б. С. Жидкие тугоплавкие окислы. — Металлургия, 1979. 288 с.

Поступила в редакцию 01.11.14

ON THE PROBLEM OF MODELING THE HEAT EXCHANGE OF CONDENSED COMBUSTION PRODUCTS OF SOLID PROPELLANT WITH A COOLING WALL

I. V. Semenov^{1,2}, D. A. Sidorenko^{1,2}, and S. M. Frolov^{2,3}

¹Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation

²Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation

³N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

Abstract: The physical and mathematical model describing heat and mass transfer due to the interaction of condensed combustion products of solid rocket motor (SRM) with a cooling wall was developed. The model takes into account formation of the film on the cooling wall from condensed combustion products and heat flux changing depending on the film thickness. The film may consist of either a solid layer or the solid and liquid layers. The model takes into account the dynamic changes in the thickness of both layers and the temperature profile within them. Two versions of the model were developed. In the first version, a linear temperature profile is adopted in the solid and liquid layers and in the second version, a linear temperature profile is adopted in the solid layer and a parabolic temperature profile is adopted in the liquid layer. A series of calculations using the developed model and the model based on the numerical solution of modified Stefan problem by the finite volume method were performed. Both stationary and nonstationary boundary conditions for mass and heat fluxes on the film surface and for the temperature of the cooling wall were imposed. The calculation results showed good agreement between the models on the dynamics of the film surface temperature and the heat fluxes into the cooling wall and on the film surface.

Keywords: heat and mass transfer; Stefan problem; two-phase film; solid propellant combustion products; cooling surface; alumina; theoretical model

Acknowledgments

The work was partly supported by the Russian Foundation for Basic Research (projects Nos. 13-01-12072 ofi-m and 15-08-00782).

References

1. Yao, L. S., and J. Prusa. 1989. Melting and freezing. *Adv. Heat Transfer* 19:1–95.
2. Rizwan-Uddin. 1998. An approximate-solution-based numerical scheme for Stefan problem with time-dependent boundary conditions. *Numerical Heat Transfer B* 33(3):269–285.
3. Thirunavukarasu, B. A. 2003. Study of solidification dynamics with liquid mass influx. Oregon State University. Thesis. 117 p.

4. Pohil, P.F., A.F. Belyaev, Yu.V. Frolov, V.S. Logachev, and A.I. Korotkov. 1972. *Gorenje poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh* [Burning of powdered metals in active media]. Moscow: Nauka. 294 p.
5. Maurah, M.A., and B.S. Mitin. 1979. *Zhidkie tugoplavkie okisly* [Liquid refractory oxides]. Metallurgy Publ. 288 p.

Received November 1, 2014

Contributors

Semenov Ilya V. (b. 1973) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading research scientist, Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation; leading research scientist, Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; semenov@icad.org.ru

Sidorenko Dmitry A. (b. 1990) — junior research scientist, Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation; programmer, Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; sidr1234@mail.ru

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; senior research scientist, Scientific Research Institute of System Analysis, Russian Academy of Sciences, 36-1 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117218, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru