

УДК 536.24 621.03

Расчет теплового нагружения разрушающегося полимерного теплозащитного материала с учетом неравновесной кинетики деструкции*

С.А. Будник, А.В. Моржухина, А.В. Нетелев, Д.Р. Рамазанова

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Россия
e-mail: netelev@mail.ru*

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-4-175-184

Поступила в редакцию 05.03.2020

После доработки 13.04.2020

Принята к публикации 14.04.2020

Разработан алгоритм обработки данных датчиков тепловых потоков, устанавливаемых во внешний разрушающийся слой теплозащитного пакета спускаемого аппарата. Исходная математическая модель теплопереноса в таком материале содержит уравнение неравновесной термохимической кинетики деструкции. Массовая скорость деструкции вычислялась как функция температуры и темпа нагрева. В основе разработанного алгоритма лежит решение обратной задачи теплопереноса методом итерационной регуляризации. Апробации разработанного алгоритма осуществлялась по данным эксперимента, проведенного в тепловой лаборатории кафедры 601 МАИ на экспериментальном стенде ТВС-2М.

Ключевые слова: разрушающиеся теплозащитные покрытия, неравновесная кинетика деструкции, обратные задачи теплопереноса, итерационная регуляризация.

Введение

Разрушающиеся полимерные материалы широко применяются в качестве элементов теплозащитных пакетов в современной ракетно-космической технике, в частности спускаемых аппаратов, предназначенных для входа в атмосферу планет. В процессе эксплуатации таких аппаратов остро встает вопрос определения теплового нагружения внешнего слоя тепловой защиты. Прямое измерение теплового потока на поверхности теплозащитного материала в этом случае не представляется возможным в связи с высокими значениями температур и процессом

деструкции в материале. Для решения этой проблемы могут использоваться интегрируемые в конструкцию тепловой защиты датчики, в которых измерительные элементы – термопары – заглублены в объеме материала. Сами датчики при этом выполняются из материала, идентичного материалу внешнего теплозащитного слоя. При выборе глубины установки измерительного элемента в датчик важно, чтобы в процессе деструкции материала датчика измерительный элемент не попал в зону деструкции, так как это может повлиять на точность измеряемых данных и привести к шунтированию термопары.

Процесс прогрева внешнего слоя тепловой защиты на основе полимерного материала сопровождается термической деструкцией [1–3], которая характеризуется тепловыми эффектами в объеме материала и выделением пиролизного газа. Процесс деструкции носит объемный характер и протекает в области, называемой зоной разложения. Границы этой зоны определяются

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 17-08-00760 и гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук, проект № 3517.2018.8.

Коллектив авторов выражает благодарность за экспериментальную поддержку сотрудникам тепловой лаборатории НИО-601 МАИ: Иванову Н.А., Меднову А.Г., Клименко Б.М., Яроцкому В.Н.

температурой, плотностью материала и темпом нагрева. Материал в зоне разложения и за ней может иметь пористую структуру, основанную на углеродном каркасе. Образовавшийся газ фильтруется в область с наименьшим давлением, участвуя при этом в процессе переноса тепла в зоне разложения и пористом остатке материала. Традиционно кинетические процессы (не только в химии) описываются полуэмпирическим одностадийным уравнением Аррениусовского типа:

$$\frac{d\rho}{d\tau} = \begin{cases} K\rho^n, & T \geq T_n, \\ 0, & T < T_n. \end{cases}, \quad K = -B \exp\left(-\frac{E}{RT}\right). \quad (1)$$

Учесть сложный характер реакции можно с помощью нелинейных коэффициентов и введения в уравнения новых членов, учитывающих температуру и темп нагрева.

Термопарные измерения в области деструкции материала и на его поверхности не дают объективной картины теплового состояния, так как образовавшийся в результате деструкции материал большей частью является углеродом, и следовательно электропроводен, что в свою очередь может привести к шунтированию термопар.

Общая структура датчика, предназначенного для интеграции в разрушающийся слой теплозащитного материала, представлена на рис. 1. Координата установки термопар выбирается из предварительного расчета глубины зоны разложения материала.

Материал датчика и его толщина идентичны материалу внешнего теплозащитного покрытия. Для снижения погрешностей измерений иде-

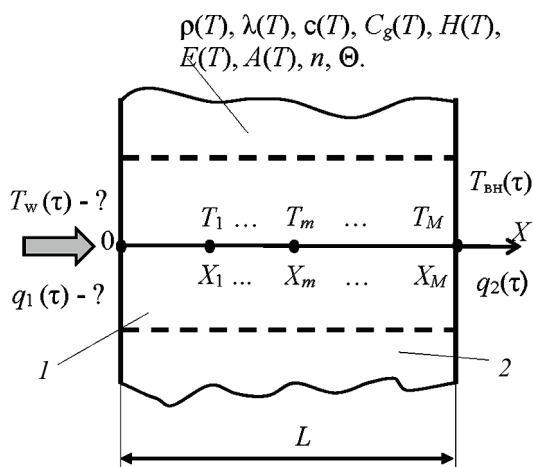


Рис. 1. Интегрируемый датчик теплового потока: 1 – датчик; 2 – слой разрушающегося теплозащитного материала; L – толщина слоя разрушающейся тепловой защиты

альным случаем было бы устанавливать термопары непосредственно во внешний слой разрушающейся тепловой защиты на этапе его нанесения на лобовой тормозной экран.

Постановка задачи

Одномерная математическая модель деструкции учитывает в объеме материала наличие двух подвижных границ, разделяющих зону незатронутого разложением материала, зону разложения, в которой протекают химические реакции и образуется фильтрующийся пиролизный газ, и зону коксового остатка, через который возможна фильтрация пиролизного газа. Положение границ в объеме материала определяется температурой начала разложения T_n , темпом нагрева $\partial T/\partial \tau$ и плотностью материала $\rho(T)$. Для однослойного материала такая математическая модель имеет вид:

$$\begin{aligned} c(T(\tau, x))\rho(T(\tau, x))\frac{\partial T(\tau, x)}{\partial \tau} = & \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T(\tau, x))\frac{\partial T(\tau, x)}{\partial x} \right) + & \\ + C_g(T(\tau, x)) \int_{x_n}^x \frac{\partial \rho(\xi, \tau)}{\partial \tau} \partial \xi \frac{\partial T(\tau, x)}{\partial x} + & \\ + H(T(\tau, x))\frac{\partial \rho(x, \tau)}{\partial \tau}, & \\ x \in (0, L), \tau \in (0, \tau_{\max}), & \end{aligned} \quad (2)$$

$$-\alpha_1 \lambda(T(0, \tau))\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \beta_1 T(0, \tau) = q_1(\tau), \quad (3)$$

$\tau \in (0, \tau_{\max}),$

$$-\alpha_2 \lambda(T(L, \tau))\frac{\partial T(L, \tau)}{\partial x} + \beta_2 T(L, \tau) = q_2(\tau), \quad (4)$$

$\tau \in (0, \tau_{\max}),$

$$T(0, x) = T_0(x), \quad x \in (0, L), \quad (5)$$

$$\rho(0, x) = \rho_0(x), \quad x \in (0, L). \quad (6)$$

Деструкция полимера описывалась уравнение Аррениуса с добавочным членом, определяющим зависимость темпа разложения от темпа нагрева.

$$\frac{\partial \rho(x, \tau)}{\partial \tau} = F(x, \tau), \quad (7)$$

где

$$F(x, \tau) = \begin{cases} 0, & T(x, \tau) < T_r \\ -\left(A(T) + \Theta \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) \rho^n \exp\left(\frac{-E(T)}{RT(x, \tau)} \right), & \rho(x, \tau) > \rho_c, T(x, \tau) \geq T_r \\ 0, & \rho(x, \tau) \leq \rho_c. \end{cases}$$

При этом математическая модель не учитывает унос материала с поверхности образца и блокировку теплового потока за счет вдува газа в пограничный слой. Это объясняется тем, что при реализации верификационного эксперимента контакт с набегающим потоком отсутствует, а уровень температур на поверхности образца не достигает температуры начала сублимации углеродистого коксового остатка. По этой же причине модель не учитывает изменение геометрии разрушающегося материала. При реализации эксперимента на реальном аппарате эти факторы могут быть учтены за счет введения соответствующих членов в уравнения (1)–(6).

В математической модели (1)–(7) искомой характеристикой является плотность теплового потока на внешней границе $q_1(\tau)$. Особенности решения обратных задач теплопереноса хорошо описаны в литературных источниках [4–6]. Среди множества существующих методов решения обратных задач наиболее универсальным в плане построения вычислительного алгоритма является метод итерационной регуляризации [7]. Данный метод нашел широкое применение при решении задач диагностики и идентификации тепловых процессов, обратных задач акустики и магнитодинамики.

В методе итерационной регуляризации для решения поставленной задачи используется дополнительная информация о температуре в некоторых внутренних точках [4]:

$$T(X_m, \tau) = f_m(\tau), \quad m = \overline{1, M}. \quad (8)$$

Источником такой информации являются установленные в материале термопары. В соответствии с алгоритмом итерационной регуляризации в этих точках вводятся фиктивные границы тепловых слоев с идеальными условиями теплового контакта:

$$\frac{\partial T(X_m - 0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(X_m + 0, \tau)}{\partial x}, \quad m = \overline{1, M-1}, \quad (9)$$

$$T(X_m - 0, \tau) = T(X_m + 0, \tau), \quad m = \overline{1, M-1}. \quad (10)$$

Алгоритм методики расчета теплового нагружения разрушающегося материала по данным косвенных измерений

На основе экспериментальных данных строится целевой функционал невязки, характеризующий разницу расчетных и измеренных температур:

$$J(q_1(\tau)) = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_{\max}} \chi_m(\tau) \times [T(d_m, \tau) - f_m(\tau)]^2 d\tau. \quad (11)$$

Для устойчивого решения задачи область поиска решения минимума функционала ограничивается с помощью условий (2)–(7), (9), (10) [7]. С учетом ограничений, накладываемых уравнениями, функционал (11) запишется в виде:

$$\begin{aligned} J(q_1(\tau)) = & \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M+1} \int_0^{\tau_m} [T(X_m, \tau) - f_m(\tau)]^2 d\tau + \\ & + \sum_{m=1}^{M+1} \int_0^{\tau_m} \int_{X_{m-1}}^{X_m} \psi(\tau, x) \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T(\tau, x)) \frac{\partial T(\tau, x)}{\partial x} \right) - \right. \\ & \left. - c(T(\tau, x)) \rho(T(\tau, x)) \frac{\partial T(\tau, x)}{\partial \tau} + C_g(T(\tau, x)) \times \right. \\ & \left. \times \int_{x_H}^x \frac{d\rho(\xi, \tau)}{d\xi} d\xi \frac{\partial T(\tau, x)}{\partial x} + H(T(\tau, x)) \frac{\partial \rho(x, \tau)}{\partial \tau} \right] d\tau dx + \\ & + \sum_{m=1}^{M+1} \int_{X_{m-1}}^{X_m} v(x) [T(0, x) - T_0(x)] dx + \\ & + \int_0^{\tau_m} \gamma(\tau, 0) \times \\ & \times \left[-\alpha_1 \lambda(T(0, \tau)) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \beta_1 T(0, \tau) - q_1(\tau) \right] d\tau + \\ & + \int_0^{\tau_m} \gamma(\tau, L) \times \\ & \times \left[-\alpha_2 \lambda(T(L, \tau)) \frac{\partial T(L, \tau)}{\partial x} + \beta_2 T(L, \tau) - q_2(\tau) \right] d\tau + \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} r(X_m, \tau) \left[\frac{\partial T(X_m - 0, \tau)}{\partial x} - \frac{\partial T(X_m + 0, \tau)}{\partial x} \right] d\tau + \\
 & + \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} w(X_m, \tau) [T(X_m - 0, \tau) - T(X_m + 0, \tau)] d\tau + \\
 & + \sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} \mu(X_m, \tau) [\rho(X_m - 0, \tau) - \rho(X_m + 0, \tau)] d\tau + \\
 & + \sum_{m=1}^{M+1} \int_0^{\tau_m} \int_{X_{m-1}}^{X_m} \Phi(\tau, x) \left[\frac{\partial \rho(x, \tau)}{\partial \tau} - F(x, \tau) \right] d\tau dx.
 \end{aligned}$$

Минимизация функционала (12) осуществлялась градиентными методами (метод сопряженных градиентов, метод скорейшего спуска):

$$\begin{aligned}
 J^{s+1}(q_1(\tau)) &= J^s(q_1(\tau)) - \gamma_s G(J'(s)), \\
 s &= 0, 1, \dots, s^*.
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

При использовании градиентных методов минимизации необходимо рассчитать значение градиента функционала невязки $J'(q)$ [8] и значение параметра спуска γ_s .

В параметризованном виде выражение для градиента функционала невязки может быть записано:

$$J'_{q_1} = \int_0^{\tau_m} \psi(x_0, \tau) \phi_k(\tau) d\tau, \tag{14}$$

где сопряженная переменная $\psi(x, \tau)$ находится из решения сопряженной задачи:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \psi_m}{\partial \tau} \rho_m C + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right) - \\
 & - \left(\frac{d\lambda}{dT} \frac{\partial T_m}{\partial x} + C_g \int_{x_H}^x \frac{\partial \rho_m}{\partial \tau} d\xi \right) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} + \\
 & + \left(\frac{dH}{dT} \frac{\partial \rho_m}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho_m}{\partial \tau} C - C_g \frac{\partial \rho_m}{\partial \tau} \right) \psi_m + \Phi_m \frac{\partial F}{\partial T} = 0, \\
 & x_{m-1} < x < x_m, \quad x_0 = 0, \quad x_{M+1} = L, \\
 & 0 \leq \tau < \tau_{\max}, \quad m = \overline{1, M+1}, \\
 & \psi_m(x, \tau_{\max}) = 0, \quad x_{m-1} \leq x \leq x_m, \\
 & x_{m-1} < x < x_m, \quad x_0 = 0, \quad x_{M+1} = L, \quad m = \overline{1, M+1}, \tag{16} \\
 & \frac{\partial \psi_1}{\partial x} \lambda(T_1(x_1, \tau)) - \psi_1 C_g(T_1(x_1, \tau)) \times \\
 & \times \int_{x_H}^x \frac{\partial \rho(T_1(x_1, \tau))}{\partial \tau} d\xi + \frac{\psi_1}{\alpha_1} \beta_1 = 0, \tag{17}
 \end{aligned}$$

$$\lambda(T_m(x_m, \tau)) \left[\frac{\partial \psi_m(x_m, \tau)}{\partial x} - \frac{\partial \psi_{m-1}(x_m, \tau)}{\partial x} \right] = \tag{18}$$

$$= \chi_m(\tau) [T_m(x_m, \tau) - f_m(\tau)], \quad m = \overline{1, M},$$

$$\psi_m(x_m, \tau) = \psi_{m+1}(x_m, \tau), \quad m = \overline{1, M}, \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\partial \Phi_m}{\partial \tau} = \Phi_m \frac{\partial F}{\partial \rho} - H \frac{\partial \psi_m}{\partial \tau} - \\
 & - \left(C \frac{\partial T_m}{\partial \tau} + \frac{dH}{dT} \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right) \psi_m - \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\int_{x_H}^x C_g \frac{\partial T_m}{\partial x} \psi_m d\xi \right), \tag{20} \\
 & \Phi_m(\tau_r) = 0, \tag{21}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial \psi_{M+1}}{\partial x} \lambda(T_{M+1}(L, \tau)) - \psi_{M+1} C_g(T_{M+1}(L, \tau)) \times \\
 & \times \int_{x_H}^x \frac{\partial \rho(T_{M+1}(L, \tau))}{\partial \tau} d\xi + \frac{\psi_{M+1}}{\alpha_2} \beta_2 = 0. \tag{22}
 \end{aligned}$$

Для определения параметра спуска использовалось выражение [7, 9]

$$\begin{aligned}
 \gamma^s &= \left(\sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} (T(x_m, \tau) - f_m(\tau)) \Delta T(x_m, \tau) d\tau \right) / \\
 & / \left(\sum_{m=1}^M \int_0^{\tau_m} \Delta T^2(x_m, \tau) d\tau \right). \tag{23}
 \end{aligned}$$

Значение приращения температуры определялось из задачи:

$$\begin{aligned}
 & \rho_m C \frac{\partial \Delta T_m}{\partial \tau} = + \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \Delta T_m}{\partial x} \right) + \\
 & + \left(\frac{d\lambda}{dT} \frac{\partial T_m}{\partial x} + C_g \int_{x_H}^x \frac{\partial \rho_m}{\partial \tau} d\xi \right) \frac{\partial \Delta T_m}{\partial x} + \\
 & + \left(\frac{d^2 \lambda}{dT^2} \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} \right)^2 + \frac{d\lambda}{dT} \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{dH}{dT} \frac{\partial \rho_m}{\partial \tau} + \right. \tag{24} \\
 & \left. + \frac{dC_g}{dT} \int_{x_H}^x \frac{\partial \rho_m}{\partial \tau} d\xi \frac{\partial T_m}{\partial x} - \rho_m \frac{dC}{dT} \frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right) \Delta T_m + \\
 & + C_g \int_{x_H}^x \frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} d\xi \frac{\partial T_m}{\partial x} + H \frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} - \theta_m C \frac{\partial T_m}{\partial \tau}, \\
 & x_{m-1} < x < x_m, \quad 0 < \tau \leq \tau_{\max}, \quad m = \overline{1, M+1}, \\
 & \Delta T(0, x) = 0, \quad x_{m-1} \leq x \leq x_m, \quad m = \overline{1, M+1}, \tag{25}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\alpha_1 \left(\lambda(T_{M+1}(0, \tau)) \frac{\partial \Delta T_1(0, \tau)}{\partial x} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x} \frac{d\lambda(T_1(0, \tau))}{dT} \times \right. \\
 & \left. \times \Delta T_1(0, \tau) \right) + \\
 & + \beta_1 \Delta T_1^i(0, \tau) = 0,
 \end{aligned} \quad (26)$$

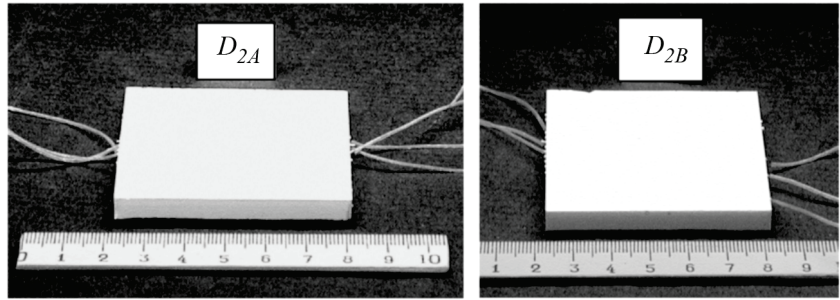


Рис. 2. Образцы теплозащитного материала с установленными термопарами

$$\frac{\partial \Delta T_m(x_m, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial \Delta T_{m+1}(x_m, \tau)}{\partial x}, \quad (27)$$

$$m = \overline{1, M},$$

$$\Delta T_m(x_m, \tau) = \Delta T_{m+1}(x_{m+1}, \tau), \quad m = \overline{1, M}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} = \begin{cases} 0, T_m \leq T_r \\ \left[\frac{\partial F}{\partial \rho} \theta_m + \frac{\partial F}{\partial T} \Delta T_m \right], \rho_m > \rho_c, T_m > T_r, \\ 0, \rho \leq \rho_c \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
 & -\alpha_2 \left(\lambda(T_{M+1}(L, \tau)) \frac{\partial \Delta T_{M+1}(L, \tau)}{\partial x} + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial T_{M+1}(L, \tau)}{\partial x} \frac{d\lambda(T_{M+1}(L, \tau))}{dT} \Delta T_{M+1}(L, \tau) \right) + \\
 & + \beta_2 \Delta T_{M+1}(L, \tau) = \sum_{k=1}^{N_p} G(J'_{q_k}) \Phi_k(\tau).
 \end{aligned} \quad (30)$$

Экспериментальная отработка разработанного алгоритма

Для верификации разработанного алгоритма был проведен эксперимент на тепло-вакуумном стенде ТВС-2М тепловой лаборатории НИО-601 МАИ. В качестве материала датчика для проведения испытаний был выбран перспективный теплозащитный материал – полистирол-полисилоксановый полимер (стиросил). Эксперименты проводились на двух одинаковых образцах материала, симметрично расположенных относительно нагревательного элемента. Образцы материала с установленными термопарами имели форму прямоугольного параллелепипеда с размерами 60×60×6 мм (длина×ширина×толщина) (рис. 2).

В испытаниях использовалась симметричная схема контактного нагрева двух образцов плоским нагревательным элементом. Схема эксперимента представлена на рис. 3.

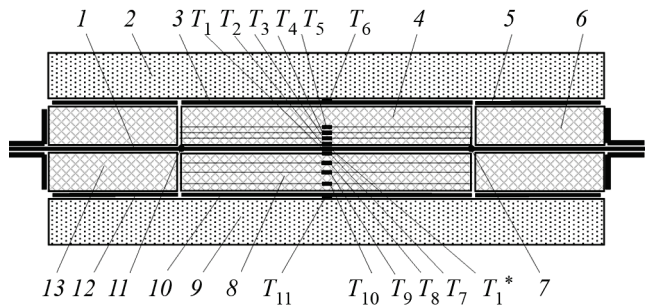


Рис. 3. Схема тепловых испытаний: 1 – нагревательный элемент (НЭ); 2 – теплоизолирующая оправка; 3 – калориметр на образце D_{2A} ; 4 – образец D_{2A} (верхний); 5 – маска верхнего калориметра; 6 – охранная рамка образца D_{2A} ; 7 – точка измерения напряжения; 8 – образец D_{2B} (нижний); 9 – теплоизолирующая оправка; 10 – калориметр на образце D_{2B} ; 11 – точка измерения напряжения; 12 – маска нижнего калориметра; 13 – охранная рамка образца B ; T_1 – термопара на НЭ; T_1^* – резервная термопара на НЭ; T_2 и T_7 – термопары на нагреваемых поверхностях образцов D_{2A} и D_{2B} соответственно; T_3 – T_5 – внутренние термопары образца D_{2A} ; T_6 и T_{11} – термопары на калориметрах; T_8 – T_{10} – внутренние термопары образца D_{2B}

В представленной схеме охранные рамки образцов материала D_{2A} и D_{2B} сделаны из того же полимерного материала, что и сам образец. В эксперименте рамки моделируют теплозащитное покрытие, в которое установлены датчики.

В качестве материала нагревательного элемента с размерами 120×80×0.1 мм (длина×ширина×толщина) использовалась лента из термостойкой нержавеющей стали. Размеры рабочей зоны нагревательного элемента – 80×60 мм. Обратные поверхности образцов и теплозащитного покрытия закрывались теплоизолирующей оправкой из материала, коэффициент теплопроводности которого значительно меньше, чем у исследуемого материала. Это позволяет моделировать наличие теплоизолирующего слоя под внешним слоем покрытия в составе реального многослойного теплозащитного покрытия. Тон-

кие медные калориметры на обратных поверхностях образцов позволяют оценить плотность теплового потока на этих поверхностях.

Для обеспечения идеального теплового контакта вся сборка обжимается при помощи стяжных элементов экспериментального модуля ЭМ-2Т.

Испытания проводились на воздухе при пониженном давлении $1 \cdot 10^{-3}$ бар в вакуумной камере. При реализации управления нагревом в качестве обратной связи использовались показания термопары Т1, установленной на нагревательном элементе.

Таблица 1. Координаты установки термопар в образцах

Датчик	Принятые координаты температурных измерений в образцах				
	X1, мм	X2, мм	X3, мм	X4, мм	X5, мм
D _{2A}	0.0	1.0	1.5	2.0	6.0
D _{2B}	0.0	2.0	3.0	4.5	6.0
Датчик	Действительные координаты точек измерения				
	X1, мм	X2, мм	X3, мм	X4, мм	X5, мм
D _{2A}	0.0	1.10±0.1	1.70±0.05	2.20±0.05	6.20±0.1
D _{2B}	0.0	2.30±0.1	3.60±0.2	5.00±0.2	6.10±0.05

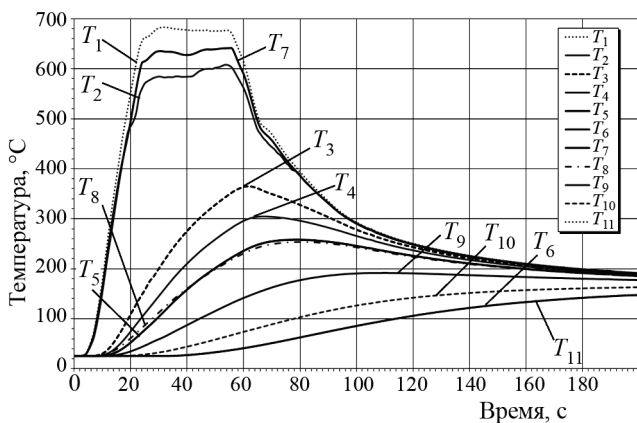


Рис. 4. Результаты температурных измерений в образцах D_{2A} и D_{2B}

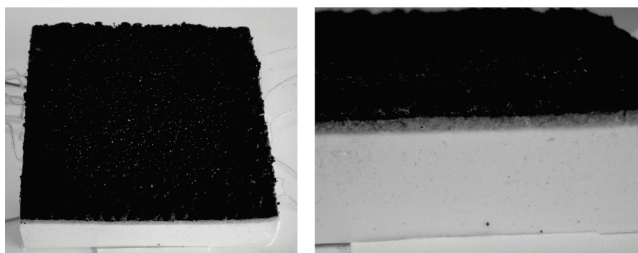


Рис. 5. Поверхность материала после проведения эксперимента

Для измерения температур в датчиках использовались термопары типа X-A (тип К) с диаметром термоэлектродов 0.1 мм, сваренные способом «в стык». Установка термопар с высокой точностью непосредственно в процессе полимеризации материала проводилась с использованием специального приспособления, разработанного в МАИ [10]. Плотность материала образцов датчиков D_{2A}, D_{2B} была равна $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$ (по данным измерений, проведенным в МАИ). Толщины образцов после уточнения: для D_{2A} – 6.2 мм; для D_{2B} – 6.1 мм.

Схемы температурных измерений (схемы размещения термопар в датчике) представлены в табл. 1. Координаты точек измерения X_m, m = 1, ..., M отсчитываются от нагреваемой поверхности датчика.

Действительные координаты установки спаев внутренних термопар контролировались с помощью рентгеноскопии.

Испытания образцов D_{2A} (A – верхний) и D_{2B} (B – нижний) готовились и проводились с учетом результатов пробных испытаний. Программа нагрева Tpr(τ) включала несколько участков:

- начальный участок продолжительностью 4 секунды с постоянным значением температуры T₀ = 25.5 °С, равным температуре в вакуумной камере на момент начала испытаний, необходимый для выхода системы управления нагревом на рабочий режим;
- первый рабочий участок – нагрев по линейному закону от начальной температуры T₀ до максимальной температуры T_{max} = 680 °С с заданным темпом нагрева 32.7°С/с;
- второй рабочий участок с постоянной температурой T_{max} = 680 °С в течение 32 с;
- третий участок – уменьшение температуры от T_{max} = 680 °С до 80 °С в соответствии с заданным режимом нагрева.

Результаты измерений, полученные в тепловом испытании, в виде термограмм T_i(τ), 0 ≤ τ ≤ τ_e после проведения первичной обработки представлены на рис. 4.

Поверхность образца после проведения эксперимента показана на рис. 5. Толщина образца материала изменилась при этом несущественно.

На рис. 6 представлена зависимость от времени плотности теплового потока от нагревательного элемента, рассчитанная по электрическим параметрам в рабочей зоне нагревательного элемента по формуле:

$$q(\tau) = Q_{electr} / (2F) = UI / (2F), \text{ где } Q_{electr} = UI. \quad (31)$$

Для расчета теплового потока использовались теплофизические характеристики исходного материала датчика (рис. 7) [11]. Значения постоянных коэффициентов уравнения (7) в расчетах принимались $\Theta = 0.038$, $m = 1$. Термокинетические характеристики определялись с помощью прибора синхронного термического анализа Jupiter 449 C и программного обеспечения компании NETZSCH [12].

Восстановленный тепловой поток представлен на рис. 8. На рис. 9 приведены значения температур, рассчитанных в токах установки термопар по восстановленному значению теплового потока. Для сравнения на рис. 9 приведены значения экспериментально определенных температур.

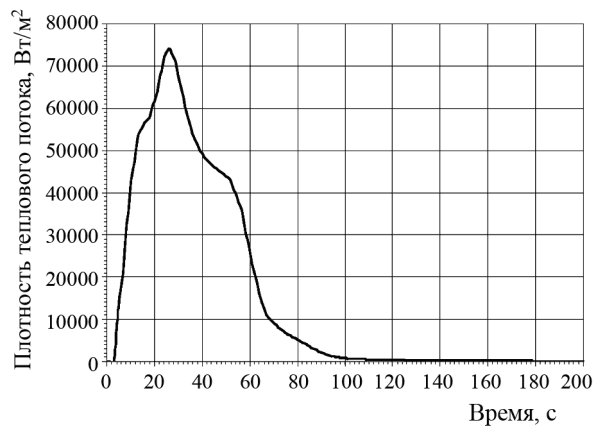


Рис. 6. Плотность теплового потока на НЭ

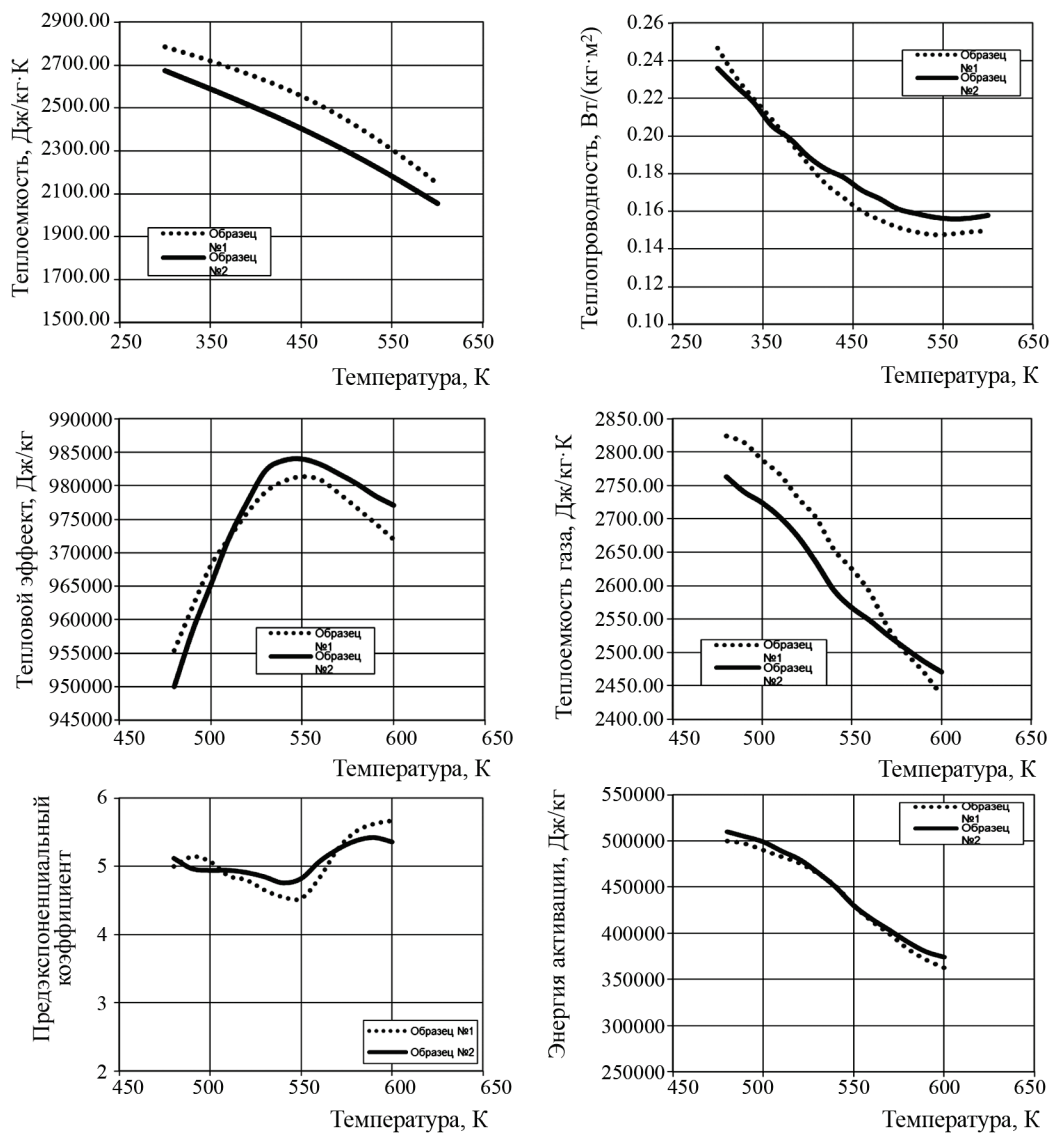


Рис. 7. Используемые в решении обратной задачи значения характеристик математической модели (1)–(7)

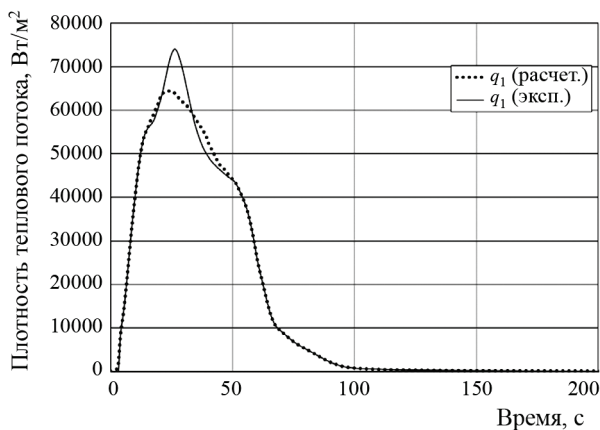


Рис. 8. Восстановленное (q_1 (расчет.)) и измеренное (q_1 (эксп.)) значения теплового потока на нагреваемой поверхности образца

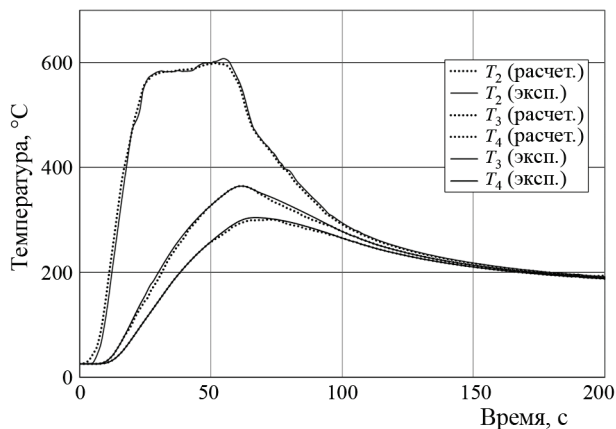


Рис. 9. Сравнение расчетных (в точках установки термопар T2 (расчет.), T3 (расчет.) и T4 (расчет.)) и измеренных (T2 (эксп.), T3 (эксп.) и T4 (эксп.)) значений температур (образец D_{2A})

В табл. 2 представлены оценки среднеквадратичного и максимального расхождения экспериментальных и расчетных значений температур.

Таблица 2. Сравнение расчетных и измеренных температур

Номер испытания	Среднеквадратичное расхождение температур, К	Максимальное расхождение температур, К
1	14.9	19.1

Заключение

Разработанный алгоритм позволяет определить значение плотности теплового потока на нагреваемой (внешней) границе полимерного разлагающегося слоя теплозащиты (надувного тормозного экрана). Представленный алгоритм основан на решении обратной задачи методом

итерационной регуляризации. Для апробации разработанного алгоритма был проведен эксперимент, который показал хорошую точность восстановления искомого теплового потока.

Список обозначений

- $c(T)$ – теплоемкость, Дж/(м³·К);
- $C_g(T)$ – теплоемкость пиролизного газа, Дж/(кг·К);
- $f_m(\tau)$ – измеренные значения температуры в точке с координатой X_m , К;
- G – оператор, определяющий выбранный метод оптимизации;
- $H(T)$ – тепловой эффект химической реакции, Дж/кг;
- $J(q_1(\tau))$ – целевой функционал невязки;
- $k = 1, 4$ – порядковый номер определяемой характеристики;
- L – толщина материала, м;
- $m = 1, M$ – номер термодатчика;
- R – газовая постоянная в уравнении Арениуса;
- s – номер итерации;
- s^* – номер последней итерации;
- $T(x, \tau)$ – температура, К;
- $T(X_m, \tau)$ – расчетные значения температуры в точке с координатой X_m , К;
- $T_0(x)$ – распределение температур в начальный момент времени по толщине образца, К;
- T_n – температура начала деструкции, К;
- x – координата, м;
- x_n – координата границы зоны начала деструкции, м;
- X_m – координата установки m -го датчика, м;
- γ_s – глубина спуска на s -й итерации;
- $\Delta T(x, \tau)$ – вариация температуры;
- $\lambda(T)$ – теплопроводность, Вт/м²;
- ρ_c – плотность кокосового остатка, кг/м³;
- $\rho_0(x)$ – зависимость плотности образца от координаты в начальный момент времени, кг/м³;
- $\theta(x, \tau)$ – вариация плотности;
- τ – время, с;
- τ_{max} – продолжительность прогрева, с;
- τ_n – время начала деструкции в точке, с;
- A, Θ, n, E – коэффициенты уравнения Арениуса;
- $\chi(\tau), \psi(x, \tau), \Phi(x, \tau), \gamma(0, \tau), \gamma(L, \tau), r(X_m, \tau), w(X_m, \tau), \eta(X_m, \tau), v(x)$ – неопределенные множители Лагранжа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hansel J.G., McAlevy R.F. Energetics and chemical kinetics of polystyrene surface degradation in inert and chemically reactive environments // AIAA Journal. 1966. V. 4. N 5. P. 841–848. DOI: 10.2514/3.3555
2. Lundell J.H., Dickey R.R., Jones J.W. Performance of charring ablative materials in the diffusion - controlled Surface Combustion regime // AIAA Journal. 1968. V. 6. N 6. P. 1115–1124. <https://doi.org/10.2514/6.1967-328>

3. Горский В.В. Теоретические основы расчета абляционной тепловой защиты. М: Научный мир, 2015. 688 с.
4. Мишин В.П., Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена-области применения при проектировании и испытаниях технических объектов // ИФЖ. 1982. Т. 42. № 2. С. 181–192.
5. Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V., Netelev A.V., Titov D.M. Destructive materials thermal characteristics determination with application for spacecraft structures testing // Acta Astronautica. 2013. V. 85. P. 113–119. DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.10.003
6. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
7. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач и их приложения к обратным задачам теплообмена. М.: Наука, 1988. 288 с.
8. Алифанов О.М., Румянцев С.В. О выводе формул для градиента невязки при итерационном решении обратных задач теплопроводности. II. Определение градиента через сопряженную переменную // ИФЖ. 1987. Т. 52. № 4. С. 668–675.
9. Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V. Extreme Methods for Solving Ill-Posed Problems with Applications to Inverse Problems. Begell House, New York/Wallinford(UK), 1995. 306 p.
10. Алифанов О.М., Будник С.А., Михайлов В.В., Ненарокомов А.В. Экспериментально-вычислительный комплекс для исследования теплофизических свойств теплотехнических материалов // Космонавтика и ракетостроение. 2006. Т. 42. № 1. С. 126–139.
11. Моржухина А.В., Нетелев А.В., Рудой И.А. Идентификация математической модели неравновесной термохимической кинетики деструкции полимерных теплозащитных материалов // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 3–4. С. 171–178.
12. <https://www.netzsch.ru/>

Calculation of heat load of ablative polymer protective material taking into account the nonequilibrium kinetics of destruction

S.A. Budnik, A.V. Morzhukhina, A.V. Netelev, D.R. Ramazanova

*Moscow Aviation Institute (Aerospace University), Moscow, 125993, Russia
e-mail: netelev@mail.ru*

Ablative polymeric materials are widely used as elements of heat-shielding packages in modern rocket and space technology, in particular, descent vehicles designed to enter the atmosphere of planets. During the operation of such devices, the question of determining the thermal loading of the outer layer of thermal protection is acute. Direct measurement of the heat flux on the surface of the heat-shielding material in this case is not possible due to the high temperatures and the degradation process in the material. To solve this problem, sensors integrated in the thermal protection can be used, in which the measuring elements – thermocouples, are buried in the bulk of the material. The sensors themselves, in this case, are made of a material identical to the material of the external heat-protective layer. When choosing the installation depth of the measuring element in the sensor, it is important that during the destruction of the sensor material the measuring element does not fall into the destruction zone, because this may affect the accuracy of the measured data and lead to thermocouple bypass.

The presented article is devoted to the development of an algorithm for processing data from heat flow sensors installed in an external collapsing layer of a heat-protective package of a descent vehicle. The initial mathematical model of heat transfer in such a material contains the equation of nonequilibrium thermochemical kinetics of destruction. The mass destruction rate was calculated as a function of temperature and heating rate. The developed algorithm is based on solving the inverse heat transfer problem by the iterative regularization method. Testing of the developed algorithm was carried out according to an experiment carried out in the “Thermal Laboratory” of the MAI department 601 at the experimental stand TVS-2M.

Keywords: ablative heat-shielding coatings, nonequilibrium destruction kinetics, inverse heat transfer problems, iterative regularization.

REFERENCES

1. Hansel J.G., McAlevy R.F. Energetics and chemical kinetics of polystyrene surface degradation in inert and chemically reactive environments. *AIAA Journal*, 1966, vol. 4, no. 5, pp. 841–848. DOI: 10.2514/3.3555
2. Lundell J.H., Dickey R.R., Jones J.W. Performance of charring ablative materials in the diffusion – controlled Surface Combustion regime. *AIAA Journal*, 1968, vol. 6, no. 6, pp. 1115–1124. <https://doi.org/10.2514/6.1967-328>
3. Gorsky V.V. *Teoreticheskie osnovy rascheta ablyacionnoy teplovoy zaschity* [Theoretical basis for calculating ablative

- thermal protection]. Moscow: Nauchnyi mir, 2015. 688 p. In Russ.
4. **Mishin V.P., Alifanov O.M.** Inverse heat transfer problems as applied for designing and testing technological objects. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1982, vol. 42, no. 2, pp. 181–191.
 5. **Alifanov O.M., Budnik S.A., Nenarokomov A.V., Netelev A.V., Titov D.M.** Destructive materials thermal characteristics determination with application for spacecraft structures testing. *Acta Astronautica*, 2013, vol. 85, pp. 113–119. DOI: 10.1016/j.actaastro.2011.10.003
 6. **Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya.** *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka, 1986, 288 p. In Russ.
 7. **Alifanov O.M., Artyukhin E.A., Rumyantsev S.V.** *Ekstremal'nye metody resheniya nekorrektnykh zadach i ikh prilozheniya k obratnym zadacham teploobmena* [Extreme methods for solving ill-posed problems and their applications to inverse heat transfer problems]. Moscow, Nauka, 1988, 288 p. In Russ.
 8. **Alifanov O.M., Rumyantsev S.V.** On derivation of the formulas for the gradient of the discrepancy at iteration solution of inverse heat conduction problems. II. Determination of the gradient through the conjugated variable. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1987, vol. 52, no. 4, pp. 668–675.
 9. **Alifanov, O.M., Artyukhin, E.A., Rumyantsev, S.V.** *Extreme Methods for Solving Ill-Posed Problems with Applications to Inverse Problems*. Begell House, New York/Wallingford (UK), 1995. 306 p.
 10. **Alifanov O.M., Budnik S.A., Mikhailov V.V., Nenarokomov A.V.** Eksperimental'no-vychislitel'nyj kompleks dlya issledovaniya teplofizicheskikh svoystv teplotekhnicheskikh materialov [Simulation computer complex for studies in thermophysical properties of termotechnical materials]. *Kosmonavtika i raketostroenie – Space and rocket science*, 2006, vol. 42, no. 1, pp. 126–139. In Russ.
 11. **Morzukhina A.V., Netelev A.V., Rudoj I.A.** Identifikatsiya matematicheskoy modeli neravnovesnoj termokhimicheskoy kinetiki destruktssii polimernykh teplozashhitnykh materialov [Identification of functionally graded materials thermophysical properties by means of inverse problems method]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2018, vol. 10, no. 3-4, pp. 171–178. In Russ.
 12. <https://www.netzsch.ru> (assessed 05.03.2020)