

УДК 536.24.01

А.Н. Голованов, А.Я. Кузин

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛООВОГО НАГРУЖЕНИЯ ОТ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ¹

На стандартных теплофизических приборах методом динамического калориметра определены коэффициенты теплопроводности и теплоемкости углепластиковых материалов в диапазоне температур $298 \text{ K} \leq T \leq 373 \text{ K}$. В результате решения коэффициентных обратных задач показано слабое влияние анизотропии на восстанавливаемые эффективные коэффициенты теплопроводности и определены их зависимости от температуры в диапазоне до 1700 K при нагреве образцов плазменной струей.

Ключевые слова: *теплофизические характеристики, анизотропия, обратная задача.*

Известно, что углепластиковые материалы, используемые в практике тепловой защиты [1], работают в нестационарных условиях в области высоких температур и интенсивных тепловых нагрузок. Необходимым этапом исследования перспективных углепластиковых материалов является определение их теплофизических характеристик (ТФХ). А поскольку восстанавливаемые эффективные ТФХ адекватно отражают условия проведения экспериментов и, в частности, зависят от темпа нагрева [2, 3], то вполне естественно определять их в натуральных либо близких к натурным условиям с использованием эффективного аппарата обратных задач (ОЗ) [4–6]. Однако некорректность ОЗ требует применения специальных методов решения [7].

Важным фактором при решении ОЗ является выбор адекватной математической модели теплопереноса, которая зависит от структуры рассматриваемых материалов. В связи с этим возникает задача исследования влияния степени анизотропии материалов на восстанавливаемые ТФХ.

С учетом вышесказанного наиболее целесообразным подходом к определению ТФХ в широком диапазоне температур является следующий: 1) при малых температурах ТФХ находятся с помощью известных и хорошо разработанных экспериментальных методик; 2) с их учетом при высоких температурах и темпах нагрева ТФХ определяются из решения ОЗ.

1. Определение ТФХ углепластиковых материалов в диапазоне температур $298 \text{ K} \leq T \leq 373 \text{ K}$

При низких температурах коэффициенты удельной теплоемкости c и теплопроводности λ углепластиковых материалов УКС и УП-ЦТ [9] определялись экспериментально методом динамического c - и λ -калориметров с помощью измерителей теплоемкости ИТС-с-400 и теплопроводности ИТ- λ -400. Диапазон изменения температур был ограничен интервалом $298 \text{ K} \leq T \leq 373 \text{ K}$ из-за технических условий эксплуатации приборов и начинающегося при $T > 373 \text{ K}$ процесса пиро-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта ФАО № 2.1.1 / 2269.

лиза связующего материала углепластиков. Убыль массы при нагреве образцов до $T = 373$ К составляла (3 – 5) % от начальной массы образцов, что, по всей видимости, связано с испарением влаги из образцов. Суммарные погрешности определения ТФХ не превышали $\delta_c \leq 10$ %, $\delta_\lambda \leq 10$ %. Доверительные границы результатов измерений γ рассчитывались по 3 – 5 опытам при доверительной вероятности $P = 0,95$. Результаты измерения ТФХ углепластиковых материалов приведены в таблице.

Теплофизические характеристики углепластиковых материалов

УКС	T , К	298	323	348	373
	c , Дж/(кг·К)	930,72	1141,10	1214,26	1434,77
	$\pm\gamma_c$, Дж/(кг·К)	71,61	30,07	32,09	32,44
	T , К	300,7	328,6	355,0	380,7
	λ , Вт/(м·К)	0,63	0,66	0,68	0,69
УП-ЦТ	$\pm\gamma_\lambda$, Вт/(м·К)	0,05	0,03	0,02	0,03
	T , К	298	323	348	373
	c , Дж/(кг·К)	732,28	1243,04	1306,52	1523,75
	$\pm\gamma_c$, Дж/(кг·К)	29,62	31,06	36,24	49,71
	T , К	299,9	327,5	353,5	379,1
	λ , Вт/(м·К)	0,49	0,51	0,50	0,52
	$\pm\gamma_\lambda$, Вт/(м·К)	0,04	0,02	0,03	0,02

2. Исследование анизотропии углепластиковых материалов

Для исследования анизотропии углепластиковых материалов были проведены специальные эксперименты на электродуговом подогревателе газа ЭДП-104 А/50 конструкции ИТФ СО РАН. Схема проведения экспериментов представлена на рис. 1. Испытуемые образцы 1, выполненные из углепластиков типа УКС и УП-ЦТ [9] в форме цилиндров высотой $h = 11,8 \cdot 10^{-3}$ м и площадью основания

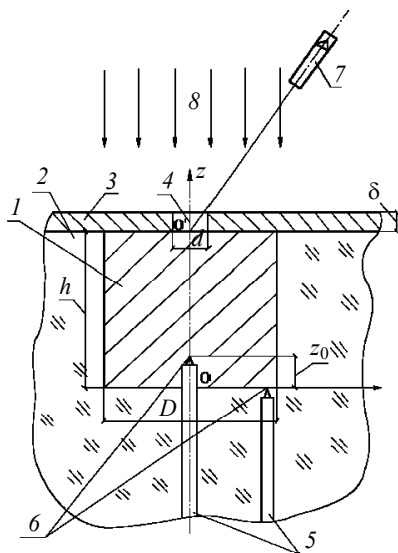


Рис. 1. Схема проведения экспериментов

$S = 167 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, помещались в асбоцементную рубашку 2. Круговой источник тепла создавался с помощью нагрева круглого отверстия в асбоцементной ткани 3 струей низкотемпературной плазмы. Диаметр отверстия составляет $d = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, толщина асбоцементной ткани $\delta = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. В процессе проведения экспериментов контролировались в зависимости от времени с помощью хромель-алюмелевых термопар, помещенных в электротермоизоляции чехлы 5: температура в точке $r = z = 0$ с внутренней стороны на оси симметрии образца – $T_1(t)$; в точке $r_0 = 0$, $z_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – $T_2(t)$; в точке $r = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $z = 0$ – $T_3(t)$. При этом диаметр спая термопары 6 составлял 10^{-4} м , а температура поверхности в окрестности лобовой критической точки (лкт) T_w замерялась с помощью быстродействующего фотоэлектрического пирометра 7, выполненного на основе фотодиода ФД-2. Стрелками 8 на рис. 1 показана струя воздушной плазмы, генерируемая электродуговым подогревателем газа ЭДП-104 А/50. Параметры плазменной струи составляли: среднемассовая температура $T_\infty = 3600 \text{ К}$, расход воздуха $G_\infty = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$, отношение коэффициента теплоотдачи α к коэффициенту удельной теплоемкости c_p при постоянном давлении $(\alpha/c_p) = 0,2 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

Значения яркостной температуры поверхности в окрестности лкт пересчитывались в действительную при коэффициенте эффективной степени черноты $\varepsilon = 0,9$. Методики определения параметров плазменной струи, а также T_w , T_{1-3} изложены в работах [8, 9]. Суммарные погрешности определения температур не превышали $\delta T_w \leq 8,3 \%$, $\delta T_{1-3} \leq 4,9 \%$. Обработка результатов измерений проводилась до момента времени $t \leq 12 \text{ с}$, соответствующему началу прогара асбоцементной ткани. При $t \geq 12 \text{ с}$ на осциллограммах записи $T(t)$ наблюдалось уменьшение величины температуры поверхности, а визуальный осмотр поверхности при $t \geq 12 \text{ с}$ подтвердил наличие прогара асбоцементной ткани в окрестности центрального отверстия. Начальная температура образцов составляла 291 – 293 К. Доверительные границы строились по результатам трех опытов с доверительной вероятностью $P = 0,95$.

Используя полученные экспериментальные данные, с помощью метода итерационной регуляризации [5, 10] были определены коэффициенты теплопроводности углепластиковых материалов на основе двумерной математической модели (ММ) теплопереноса в цилиндрической системе координат (рис. 1):

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z}); \quad (1)$$

$$t = 0: T = T_0; \quad (2)$$

$$z = h: \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \text{ при } d/2 < r \leq D/2; \quad (3)$$

$$T = T_w, \text{ при } 0 \leq r \leq d/2;$$

$$z = 0: \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (4)$$

$$r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (5)$$

$$r = D/2: \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (6)$$

где T , r , z – температура и цилиндрические координаты соответственно; λ_r , λ_z –

главные коэффициенты теплопроводности ортотропного материала, подлежащие определению.

Функционал, характеризующий отклонение расчетных температур от экспериментальных, выбирался в виде

$$I = \sum_{j=1}^N \int_0^{t_m} (T_j - T_j^0)^2 d\tau, \quad (7)$$

где T , T^0 – расчетная и экспериментальная температуры; N – число датчиков температуры.

Отметим, что указанный подход может быть легко перенесен на изотропный случай, когда $\lambda_r = \lambda_z$. При решении ОЗ считалось, что восстанавливаемые коэффициенты λ_r и λ_z являются величинами постоянными, а выход из итерационного цикла осуществлялся по числу итераций, согласованному с погрешностью ЭД в 5 %. Расчеты в предположении $\lambda_r \neq \lambda_z$ выявили малость степени анизотропии материала в указанном диапазоне температур из-за близости полученных коэффициентов теплопроводности к ранее полученным коэффициентам при допущении изотропности материала и постоянства восстанавливаемой характеристики.

3. Определение коэффициентов теплопроводности в зависимости от температуры

Следует отметить, что при увеличении температурного фактора и интенсивности прогрева по глубине материала следует ожидать заметного влияния T на λ . Поэтому из решения ОЗ в рамках одномерной математической модели (ММ) были определены зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры для углепластиковых материалов УКС и УП-ЦТ в предположении их изотропности при известных коэффициентах удельной теплоемкости и плотности. Искомые зависимости аппроксимировались квадратичными парабололами $\lambda(T) = \lambda_0 + k_1(T - T_0) + k_2(T - T_0)^2$. В качестве λ_0 использовалось значение, найденное экспериментально при низких температурах на приборе ИТ- λ -400, что позволило снизить некорректность коэффициентной ОЗ. Параметры k_1 , k_2 определялись из условия минимума функционала методом сопряженных градиентов [4]. Итерационный процесс поиска параметров завершался при достижении функционалом уровня суммарной погрешности, состоящей из погрешности экспериментальных данных и вычислительной погрешности. Теоретические значения температур в функционале определялись из решения прямой задачи (ПЗ) итерационно-интерполяционным методом [11]. При решении ОЗ и ПЗ в качестве граничных условий использовались экспериментальная температура на оси внешней нагреваемой поверхности образца и условие адиабатичности на внутренней поверхности. Экспериментальная температура во внутренней точке $r = 0$, $z = 3 \cdot 10^{-3}$ м использовалась в качестве контрольной при решении ОЗ. Плотность материалов определялась экспериментально.

На рис. 2 для образцов из материала УКС сплошными кривыми представлены экспериментальные температурные зависимости на нагреваемой поверхности $r=0$, $z = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м – рис. 2, *a* и в точках с координатами $r = 0$, $z = 3 \cdot 10^{-3}$ м (кривая 2); $r = 0$, $z = 0$ (кривая 1) – рис. 2, *b*. Для этой серии экспериментов нагрев образцов осуществлялся не «локально», а со всего верхнего торца цилиндра. Плазменная струя натекала на образец без асбоцементной ткани 3 (см. рис. 1). На рис. 3, *a* сплошными кривыми приведены известные зависимости ТФХ материала УКС от

температуры. Штриховой кривой на этом рисунке изображена зависимость $\lambda(T)$, полученная из решения ОЗ при следующих значениях параметров: $\lambda_0 = 0,7$ Вт/(м·К); $T_0 = 300$ К; $\rho = 1147$ кг/м³. Величины оптимизируемых параметров, соответствующие минимуму функционала, оказались равными: $k_1 = 6,688 \cdot 10^{-5}$, $k_2 = 1,605 \cdot 10^{-8}$. Штриховой кривой на рис. 2, *b* показана температура в точке $r = 0$, $z = 3 \cdot 10^{-3}$ м, полученная из решения ПЗ с найденной из ОЗ зависимостью $\lambda(T)$. Наблюдается хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений температур.

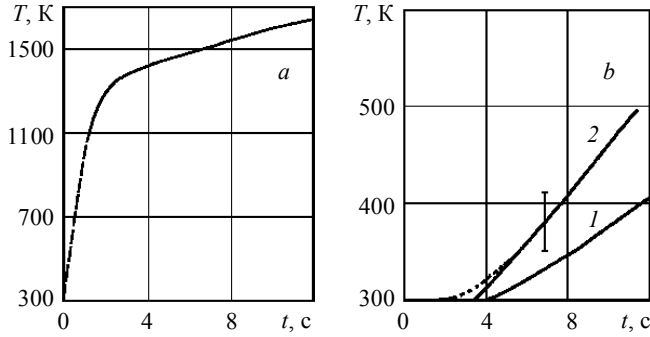


Рис. 2. Температура нагреваемой поверхности

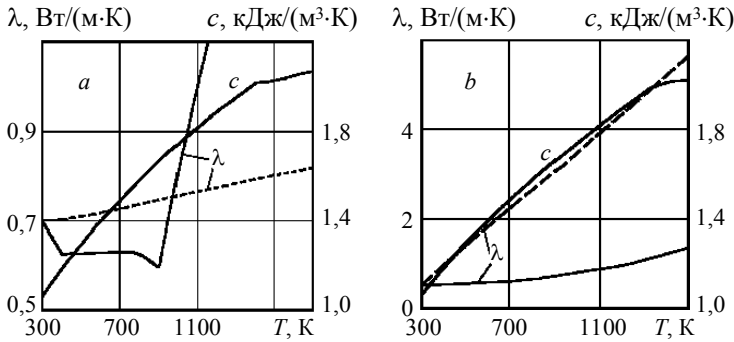


Рис. 3. Зависимости теплофизических характеристик материала УКС от температуры

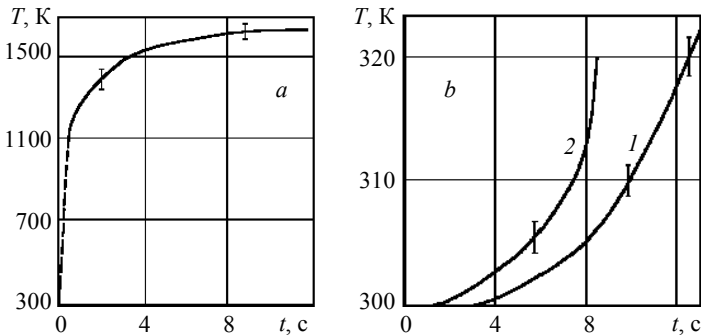


Рис. 4. Зависимость $\lambda(T)$ для материала УП-ЦТ

Используя ЭД на рис. 4, из решения ОЗ при значениях параметров $\lambda_0 = 0,55 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; $T_0 = 300 \text{ К}$; $\rho = 1146 \text{ кг/м}^3$ была определена зависимость $\lambda(T)$ для материала УП-ЦТ (штриховая кривая на рис. 3, *b*). Решение ПЗ с этим коэффициентом теплопроводности показало удовлетворительное согласование расчетных (штриховая) и экспериментальных (сплошная кривая) значений температур во внутренней точке образца $r = 0$, $z = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Сплошными кривыми на рис. 3, *b* представлены известные зависимости $\lambda(T)$ и $c(T)$ для материала УП-ЦТ. Значения оптимизируемых параметров в точке минимума функционала оказались равными: $k_1 = 4,204 \cdot 10^{-3}$, $k_2 = -1,243 \cdot 10^{-9}$. Необходимость определения коэффициентов теплопроводности материалов УКС и УП-ЦТ подтверждается результатами решения ПЗ с известными (рис. 3) коэффициентами теплопроводности. Так, максимальное отличие полученных в этом случае расчетных значений температур от экспериментальных во внутренней точке образцов составило 50 градусов для материала УКС и 35 градусов – для материала УП-ЦТ при общем невысоком уровне температур (рис. 2, *b* и 4, *b*).

Авторы благодарят за помощь в проведении вычислений Кима Л.В.

Выводы

1. В ходе проведенных теплофизических испытаний на стандартных теплофизических приборах ИТ- λ -400 и ИТС- c -400 определены их эффективные коэффициенты теплопроводности и теплоемкости углепластиковых материалов УКС и УП-ЦТ в диапазоне температур $298 \text{ К} \leq T \leq 373 \text{ К}$.

2. По результатам измерений температур углепластиковых материалов, помещенных в струю низкотемпературной плазмы, и решения методом итерационной регуляризации двумерной коэффициентной ОЗ показано слабое влияние анизотропии на восстанавливаемые эффективные коэффициенты теплопроводности.

3. Из решения одномерной коэффициентной ОЗ определены функциональные зависимости эффективных коэффициентов теплопроводности от температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 391 с.
2. Несмелов В.В. Влияние темпа нагрева на характеристики теплопереноса при термической деструкции фенольного углепластика // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29. № 6. С. 53–58.
3. Зинченко В.И., Несмелов В.В., Якимов А.С. Исследование термохимического разрушения углефенольного композиционного материала в потоке высокотемпературного газа // Там же. 1995. Т. 31. № 1. С. 80–88.
4. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
5. Алифанов О.М., Артюхин Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1988. 288 с.
6. Гришин А.М., Зинченко В.И., Кузин А.Я. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. 418 с.
7. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1974. 224 с.
8. Голованов А.Н. Теплообмен плазменной струи и полусферической стенки при наличии вдува газа-охлаждителя через круглые отверстия // Журн. прикл. мех. и техн. физ. 1988. № 2. С. 18–23.
9. Голованов А.Н. О влиянии периодических возмущений на процессы термохимического разрушения некоторых композиционных материалов // Физика горения и взрыва. 1998. № 3. С. 67–73.

10. *Ким Л.В.* Метод итерационной регуляризации при решении коэффициентной обратной задачи теплопроводности // Механика реагирующих сред: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 1989. С. 235–250.
11. *Гришин А.М., Зинченко В.И., Ефимов К.Н. и др.* Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. 320 с.

Статья принята в печать 01.11.2010 г.

Golovanov A.N., Kuzin A.Ya. RECONSTRUCTION OF EFFECTIVE COEFFICIENTS OF THERMAL CONDUCTIVITY OF CARBON-FILLED PLASTIC MATERIALS UNDER THE CONDITIONS OF A THERMAL LOADING FROM A PLASMA JET. The coefficients of thermal conductivity and heat capacity of carbon-filled plastic materials were determined by the dynamic calorimeter method on standard thermophysical devices over the range of temperatures $298 \text{ To} \leq T \leq 373 \text{ To}$. As a result of the solution of the coefficient inverse problems, anisotropy is shown to have a weak effect on the restored effective coefficients of thermal conductivity, and the coefficients are determined as functions of temperature over the range to 1700 To are at a heating of samples by a plasma jet.

Keywords: thermophysical characteristics, anisotropy, inverse problem.

GOLOVANOV Aleksandr Nikolaevich (Tomsk State University). E-mail: fire@mail.tsu.ru

KUZIN Aleksandr Yakovlevich (Tomsk State University)