

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗИНЫ МАРКИ 1001 ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ РАКЕТНЫХ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время производство ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ) из композиционных материалов занимает одно из самых важных мест в ракетно-космической технике. Эти двигатели применяются для старта ракет-носителей и отделения их ступеней, сброса полезного груза, торможения и ускорения космических аппаратов (КА), стабилизации, коррекции траектории и орбиты, а также в качестве двигателей метеорологических ракет, служащих для подъема измерительной аппаратуры в верхние слои атмосферы. Преимуществами РДТТ, обеспечивающими такое широкое применение в ракетно-космической отрасли, является хорошая воспроизводимость параметров, в том числе требования к импульсу тяги, высокий коэффициент массового совершенства, длительность гарантийного срока использования и относительная безопасность при хранении и эксплуатации [1].

С учетом высокой потребности в этих двигателях в ГП «КБ «Южное» разрабатывается такая модель двигателя в виде моноблочной конструкции с прочноскрепленным зарядом, цельномотаной силовой оболочкой типа «кокон» из высокоэффективных композиционных материалов и внутренней теплозащитой. Теплозащита двигателя представляет собой многослойное покрытие, которое должно предохранять оболочку корпуса в температурном диапазоне от -60 до $+75$ °C ($213...346$ K), а кратковременно до $+200$ °C (473 K).

В качестве основного материала теплозащитного покрытия предложена резиновая смесь марки 1001 разработки ГП «КБ «Южное» и ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ», г. Днепропетровск. Основными теплофизическими характеристиками таких материалов являются удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности, значения которых зависят от температуры. Для их оценки проведены экспериментальные исследования в диапазоне температур от -50 до $+250$ °C и получены результаты измерений на трех образцах. Образцы представляют собой диски диаметром 15 мм и высотой 10 мм. Для измерения использовали прибор ИТ-С-40, основой которого является сравнительный метод динамического калориметра с тепломером и диабатической оболочкой. Образцы размещали внутри металлических капсул, монотонно разогревали вме-

сте с ними за счет непрерывно поступающего к каждому через тепломер теплового потока и измеряли их удельную теплоемкость.

Измерения удельной теплоемкости резины 1001 проводили дискретно в диапазоне от -50 до $+250$ °C с интервалом 25 °C. Они представлены в табл.1 для трех образцов с оценкой их средних значений.

Таблица 1 – Результаты измерения удельной теплоемкости резины 1001

Температура		Удельная теплоемкость, Дж/(кг·град)			
Точка К	T_K^0 , °C	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Среднее значение
-	-50	1036,1	871,3	882,3	929,9
-	-25	1518,0	1482,2	1553,8	1518,0
0	0	1621,5	1543,7	1682,7	1616,0
1	25	1818,0	1710,7	1755,3	1761,3
2	50	2074,9	1872,4	2070,7	2006,0
3	75	2161,6	1994,9	2113,2	2089,9
4	100	2308,9	2134,1	2267,0	2236,7
5	125	2442,5	2325,3	2426,7	2398,2
6	150	2489,0	2436,0	2501,0	2475,3
7	175	2627,4	2410,3	2593,4	2543,7
8	200	2868,1	2503,8	2673,0	2681,6
-	225	1437,1	1368,2	1529,8	1445,0
-	250	871,2	731,8	763,7	788,9

Из визуального первичного анализа этих измерений видна их случайность и зависимость от температуры. При этом можно выделить три участка ($-50 \dots -25$ °C), ($0 \dots +200$ °C) и ($+200 \dots +250$ °C) с разными визуально наблюдаемыми скоростями изменения удельной теплоемкости: на первом – $+13$ Дж/кг·град; на втором – $+5$ Дж/кг·град; на третьем – -24 Дж/кг·град.

Установлено, что при температуре выше $+200$ °C резина разбухает и образцы теряют свою целостность. Вид такого образца показан на рис. 1.

На втором участке от 0 до $+200$ °C визуально наблюдается линейная связь удельной теплоемкости $Q(T)$ и температуры нагрева T :

$$Q(T) = Q_0 + q \cdot T. \quad (1)$$



Рисунок 1 – Внешний вид образца резины 1001 после измерения удельной теплоемкости

Коэффициент такой аппроксимации Q_0 и q можно оценить по средним значениям экспериментальных измерений в точках $T_K = 25 \cdot K$, $K = 0, 1, 2 \dots 8$, используя метод наименьших квадратов суммарной ошибки аппроксимации:

$$\Delta Q = \sum_{K=0}^8 [Q(T_K) - (Q_0 + q \cdot T_K)]^2. \quad (2)$$

Обозначим измерение $Q(T_K) = x_K$, $T_K = 25 \cdot K$ и по выборке средних значений x_K оценим Q_0 и q , решив систему уравнений:

$$\sum_{K=0}^8 (Q_0 + 25 \cdot q_K) = \sum_{K=0}^8 x_K; \quad (3)$$

$$\sum_{K=0}^8 (Q_0 + 25q_K) \cdot K = \sum_{K=0}^8 K \cdot x_K. \quad (4)$$

Учитывая, что измерения фиксируются через каждые 25°C и суммы K и K^2 равны, т.е.

$$\sum_{K=0}^n K = \frac{n \cdot (n+1)}{2}, \quad \sum_{K=0}^n K^2 = \frac{n \cdot (n+1)(2n+1)}{6}, \quad (5)$$

и, решив систему уравнений при $n = 8$, для оценки коэффициентов Q_0 и q получим формулы и их значения

$$q = \frac{1}{21} \sum_{K=0}^8 0,01 \cdot Q(T_K) \cdot (2 \cdot K - 9) = 5,23; \quad (6)$$

$$Q_0 = 12,5 \sum_{K=0}^8 (Q(T_K) - 9 \cdot q) = 1668. \quad (7)$$

Формулу для линейной аппроксимации зависимости удельной теплопроводности от температуры T °C в интервале от 0 до +200 °C запишем в виде

$$Q_0(T) = 1668 + 5,23 \cdot T. \quad (8)$$

Проведем статистический анализ измерений удельной теплоемкости. Определим отклонения каждого измерения от значения аппроксимирующего полинома, оценим их среднее значение и выборочные дисперсии. В табл. 2 представлены значения аппроксимации в точках измерений и их отклонения.

Таблица 2 - Значения аппроксимации в точках измерения

Температура, °C	Удельная теплоемкость, Дж/(кг×град)		Погрешность аппроксимации (%) экспериментальных данных и их среднего значения			
	Среднее	Аппроксимация	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Среднее
-50	929,9	929,9	11,41	-6,31	-5,13	0,00
-25	1518,0	1480	2,55	0,14	4,97	2,55
0	1616,0	1650	-1,74	-6,45	1,97	-2,07
25	1761,3	1811	0,40	-5,53	-3,07	-2,73
50	2006,0	1962	5,75	-4,57	5,54	2,24
75	2089,9	2104	2,74	-5,18	0,44	-0,67
100	2236,7	2236	3,24	-4,58	1,37	0,01
125	2398,2	2360	3,52	-1,45	2,85	1,64
150	2475,3	2473	0,64	-1,51	1,12	0,08
175	2543,7	2578	1,93	-6,49	0,61	-1,31
200	2681,6	2673	7,32	-6,31	0,02	0,34
225	1445,0	1445	-0,55	-5,32	5,87	0,00
250	788,9	789	10,43	-7,24	-3,19	0,00

В табл. 3 представлены их средние значения $\Delta \bar{Q}_i$ и стандартные значения разбросов (корень квадратный из выборочных дисперсий $\sqrt{D_i^*}$).

Таблица 3 – Средние значения разности

$\Delta \bar{Q}_1$	$\Delta \bar{Q}_2$	$\Delta \bar{Q}_3$	$\Delta \bar{Q}_4$	$\sqrt{D_1^2}$	$\sqrt{D_2^2}$	$\sqrt{D_3^2}$	$\sqrt{D_4^2}$
67	-97,5	30,4	-0,033	67,2	70,1	62,3	51,24

Гипотеза о равенстве средних значений проверена по критерию Стьюдента, а дисперсий – по критерию Фишера [2, 3]. С вероятностью 0,997 гипотеза об их равенстве подтверждается. Из этого следует вывод, что исследуемые три образца статистически одинаковы и разброс их удельной теплоемкости с вероятностью 0,95 не превышает 102 Дж/кг град ($2 \cdot \sqrt{D^*} < 102$).

Исследования коэффициента теплопроводности резины 1001 были проведены с использованием прибора ИТ-Л-400 в температурном диапазоне -40...+250 °С. Измеритель предназначен для исследования температурной зависимости теплопроводности твердых механически обрабатываемых материалов в режиме монотонного нагрева. Для измерения теплопроводности в измерителе применен метод динамического калориметра.

Полученные результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Результаты измерения коэффициента теплопроводности резины 1001

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)			
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Среднее значение
-41,9	0,2615	0,2504	0,259	0,2569
-31	0,2617	0,2512	0,2628	0,2586
-20,5	0,2707	0,2601	0,2633	0,2647
-10	0,2723	0,2616	0,2653	0,2664
1,8	0,2723	0,2593	0,2693	0,265
10,3	0,2739	0,2617	0,2714	0,269
20,3	0,2723	0,2605	0,2643	0,2657
30,3	0,2741	0,2651	0,2698	0,2697
40	0,2767	0,2696	0,2708	0,2724
49,7	0,2816	0,2707	0,2741	0,2755
59,4	0,2795	0,27	0,2745	0,2746
69	0,2802	0,2727	0,2727	0,2752
78,6	0,2826	0,2764	0,278	0,279
88,3	0,2818	0,218	0,2785	0,2804
97,9	0,2868	0,286	0,2853	0,286
107,6	0,2849	0,2843	0,2848	0,2847

Продолжение таблицы 4

Температура, °C	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K)			
	Образец №1	Образец №2	Образец №3	Среднее значение
117,3	0,2932	0,2895	0,2912	0,2913
127,1	0,2941	0,2923	0,292	0,2928
136,9	0,3019	0,298	0,299	0,2996
146,8	0,2916	0,2728	0,2819	0,2821
156,8	0,2724	0,2614	0,2684	0,2674
166,8	0,2647	0,2596	0,2612	0,2618
176,8	0,262	0,2533	0,2566	0,2573
186,8	0,2586	0,2562	0,2568	0,2572
196,8	0,2684	0,2548	0,2624	0,2619
206,8	0,2726	0,2635	0,2641	0,2667
216,8	0,2714	0,262	0,2679	0,2671
226,8	0,2728	0,2547	0,2675	0,265
236,7	0,2661	0,2491	0,2616	0,2589
246,8	0,2714	0,253	0,2558	0,2601
256,4	0,2774	0,2599	0,2593	0,2655
266,2	0,274	-	0,257	0,2655
275,9	0,2858	-	0,2797	0,2828

Визуальный анализ измерений теплопроводности исследуемых образцов при разных значениях температуры позволяет сделать предположение об очень слабом влиянии температуры на проводимость резины. Это подтверждается и цифрами средних значений коэффициентов теплопроводности $\bar{K}_T$ и стандартных значений $\sqrt{D_T^*}$, характеризующих разброс измерений, представленных в табл. 5.

Таблица 5 – Средние значения коэффициентов теплопроводности

$\bar{K}_{T_1}$	$\bar{K}_{T_2}$	$\bar{K}_{T_3}$	$\bar{K}_{T_4}$	$\sqrt{D_{T_1}^*}$	$\sqrt{D_{T_2}^*}$	$\sqrt{D_{T_3}^*}$	$\sqrt{D_{T_4}^*}$
0,277	0,268	0,271	0,273	0,01	0,0132	0,0116	0,0117

Сравнение средних значений измерений теплопроводности по критерию Стьюдента подтверждает вывод об их равенстве с вероятностью 0,997.

Проведенные экспериментальные исследования образцов резиновой смеси марки 1001 позволяет сделать вывод о возможности их практического использования в теплозащитных конструкциях. При изменении температуры от -50 до +200 °C удельная теплоемкость резины возрас-

тет от 930 Дж/кг·град до 2682 Дж/кг·град. Это позволяет заключить, что исследуемый материал сохраняет свои эксплуатационные свойства. При температуре свыше 200 °С имеет место резкое уменьшение удельной теплоемкости, причинами которого являются экзотермическая реакция разложения материала и потеря его целостности. Теплопроводность материала не зависит от температуры в диапазоне от -50 до +200 °С.

Список использованных источников

1. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці: підруч. [Текст] / Є.О. Джур, Л.Д. Кучма, Т.А. Манько, В.Г. Сітало, Ф.П. Санін, А.Ф. Санін. – К.: Вища освіта, 2003. – 399 с.
2. Колемаев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.А. Колемаев, О.В. Староверов, В.Б. Турундаевский. – М.: Высшая школа, 2001. – 400 с.
3. Кремер, Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / Н.Ш. Кремер. – М.: ЮНИТИ, 2000. – 543 с.

*Поступила в редакцию 15.01.2016.
Рецензент: канд. техн. наук,
ст. науч. сотр. О.А. Карпикова,
Государственное предприятие
«Конструкторское бюро «Южное»,
г. Днепропетровск.*