

УДК 536.2.083

Г. А. ФРОЛОВ¹, Д. В. БОРОВИК¹, А. Д. КОЛОТИЛО¹,
 А. Л. ЛАМЕКО², Е. В. ОЛИГОВ², А. В. ПАНЫЧ²,
 А. М. ПОТАПОВ³, В. Г. ТИХИЙ³, И. А. ГУСАРОВА³

¹ Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины

² ГП «НПЦ «Энергоимпульс» Института электродинамики НАН Украины

³ Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное», Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ДИАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР -60...+250 °С И ДАВЛЕНИЙ ОТ 10⁵ ДО 10⁻¹ Па

На установке для исследования теплофизических характеристик низкотеплопроводных материалов были определены эффективные теплофизические характеристики (теплопроводность и теплоемкость) сотовых конструкций в диапазоне температур от - 60 до +250 °С при давлении от 10⁵ до 10⁻¹ Па. Установка позволяет определять тепло- и температуропроводность на образцах диаметром 120 мм и толщиной до 30 мм. Измерения проводятся в нестационарном режиме при постоянной температуре поверхности, которая обеспечивается специальной системой контроля и управления. Установлено, что для всех режимов нагрева эффективная теплопроводность образцов сотовых конструкций аппроксимируется линейной зависимостью с погрешностью, не превышающей 20%.

Ключевые слова: сотовая теплоизоляция, нихромовый нагреватель, автотемпературный режим, активная защита, факторы космического пространства, теплоприемник, термопара, измерительная ячейка.

Введение

В работе [1] была предложена и исследована установка для измерений эффективных теплофизических характеристик низкотеплопроводных материалов (УТХНМ), в том числе образцов сотовых панелей, представляющих собой трехслойную конструкцию. Как правило, эта конструкция состоит из заполнителя (бумажные или алюминиевые соты) и обкладок из стеклопластика или углепластика. Вместе с низким удельным весом и хорошими прочностными свойствами, она обладает также низкой теплопроводностью и может применяться, например, для изготовления аэродинамических обтекателей ракет и элементов конструкций космических аппаратов. В работе [1] было проведено исследование УТХНМ и показано, что она позволяет с достаточной точностью определять эффективную теплопроводность и температуропроводность. Откуда, зная кажущуюся плотность образца сотовой конструкции, можно определить и его эффективную теплоемкость по формуле:

$$c = a \cdot \rho / \lambda, \quad (1)$$

где c , a – теплоемкость и температуропроводность;
 ρ , λ – плотность и теплопроводность.

В данной работе продолжено исследование этих характеристик для образцов трёхслойной теплоизоляции 2-х партий по 6 штук в каждой. Образ-

цы были изготовлены в форме цилиндра (\varnothing 120 мм, высота ~25,5 и ~26,5 мм, соответственно в 1-й и 2-й партиях), имели обшивки из углепластика: в 1-й партии – ЛУП-0,1+ЭДТ-69У, а во второй – УТО-4510+ЭДТ-69Э (в дальнейшем ЛУП и УТО), между которыми находился сотовый наполнитель ПСП с размером грани 2,5 мм (рис. 1).

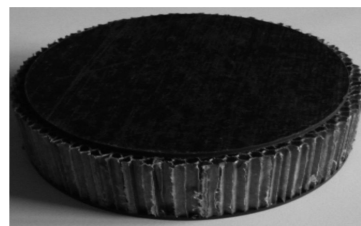


Рис. 1. Образец сотовой панели для определения коэффициента теплопроводности

1. Оборудование для проведения экспериментов

Для определения эффективной теплопроводности и теплоемкости применялось следующее оборудование:

- измеритель теплоемкости ИТ-с-400, предназначенный для исследования температурной зависимости удельной теплоемкости [2];
- климатическая камера «МІНІ САБЗЕРО

МС-71» с характеристиками: диапазон рабочих температур от -80 до $+100$ °С, стабильность поддержания заданной температуры $\pm 0,5$ °С, равномерность температуры $\pm 1,0$ °С;

- установка УТХНМ, для измерения эффективной теплопроводности и температуропроводности [1].

Установка УТХНМ включает следующие основные системы:

1. Вакуумную систему, в состав которой входит вакуумная камера, форвакуумный насос 2НВР-5ДМ, турбомолекулярный насос НВТ-340-028-А с блоком питания БП-267, вакуумные клапаны КВУМ-40Л, прибор SEO-VAC для контроля вакуума в диапазоне от 10^5 до 10^{-4} Па.

2. Компьютеризированную систему контроля и управления температурами основного и компенсирующего нагревателя.

3. Измерительную ячейку, в которой расположены образец, главный и компенсирующий нагреватели.

2. Определение эффективной теплопроводности образцов сотовой конструкции в диапазонах температур от $-40...+250$ °С, $-60...+100$ °С и в диапазоне давлений от 10^5 до 10^{-1} Па

В процессе проведения экспериментов было установлено, что использование азота для охлаждения не дает возможности обеспечить начальное равномерное распределение температуры. Поэтому для получения минусовых температур была использована климатическая камера, а конструкция измерительной ячейки была доработана (рис. 2).

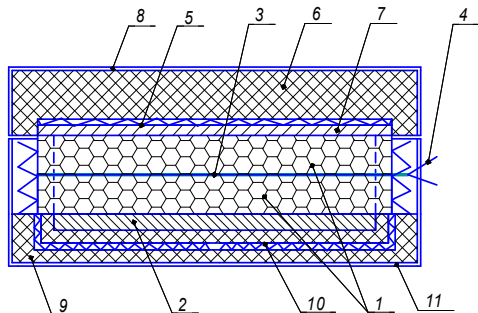


Рис. 2. Схема измерительной ячейки установки УТХНМ: 1 – образец (в варианте измерения температуропроводности состоит из двух пластин); 2 – теплоприемник; 3 – датчик температуры, изготовленный из медной фольги; 4 – хромель-копелевая термопара; 5 – спираль основного нагревателя; 6 – теплоизоляция; 7 – медная пластина основного нагревателя; 8 – крышка блока нагревателя; 9 – теплоизоляция теплоприемника; 10 – спираль компенсирующего нагревателя; 11 – корпус измерительной ячейки

Измерительная ячейка с образцом сотовой конструкции размещалась в климатической камере, которая выводилась на температуру минус 40 °С и минус 60 °С (см. табл. 1). На блоке измерения и управления для каждого эксперимента задавалась температура главного нагревателя в диапазоне от $+1$ °С до $+250$ °С с интервалом 50 °С.

При измерениях в вакууме измерительная ячейка размещалась в вакуумной камере. Эксперименты проводились при давлении 10^{-1} Па в диапазоне температур от ~ 10 °С до 200 °С.

Определение значений эффективных теплофизических характеристик образцов трёхслойных сотовых конструкций выполнялось в условиях, приведенных в табл. 1.

Таблица 1
Условия окружающей среды

Окружающая температура, °С	Изменение температуры главного нагревателя, °С	Давление окружающей среды, Па
-40	1 - 250	10^5
-60	1 - 250	10^5
-40	1 - 100	10^5
$\sim 10-20$	50 - 200	10^{-1}

Учитывая большую длительность экспериментов, были проведены предварительные испытания 5 образцов из каждой партии на одном режиме: температура главного нагревателя 100 °С, а начальная температура теплоприемника ~ 20 °С. Полученные результаты приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2
Эффективный коэффициент теплопроводности для образцов сотовой конструкции с обкладками из углепластика ЛУП-0,1+ЭДТ-69У

№ образца	1	2	3	4	6
Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,078	0,079	0,080	0,080	0,080

Таблица 3
Эффективный коэффициент теплопроводности для образцов сотовой конструкции с обкладками из углепластика УТО-4510+ЭДТ-69Э

№ образца	1	2	3	4	5
Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	0,097	0,092	0,091	0,097	0,097

Для контроля массы части образца, которая попадала в зону измерения (100 мм) и рассчитывалась для этого диаметра, диаметр двух образцов (№ 5 и № 6 в каждой партии) был изменен на 100 мм. Определение массы необходимо для расчета теплоемкости аддитивным методом.

Из таблиц 2 и 3 видно, что эффективные коэффициенты теплопроводности всех образцов в каждой партии (ЛУП и УТО, соответственно для 1-й и 2-й партий) отличаются от среднего значения не более, чем на 3 %. Поэтому для дальнейших экспериментов были выбраны следующие образцы: для сотовой конструкции с обкладками из углепластика ЛУП – образцы № 4 и № 6, а с обкладками из углепластика УТО – образец № 1. Отличие среднего значения эффективного коэффициента теплопроводности одной партии образцов от другой не превышает 15 %.

Как видно из рис. 3, значения эффективного коэффициента теплопроводности практически линейно зависят от температуры отнесения (средняя температура между верхней и нижней обкладками). Расчеты показывают, что максимальное отклонение от прямой линии не превышает 15%.

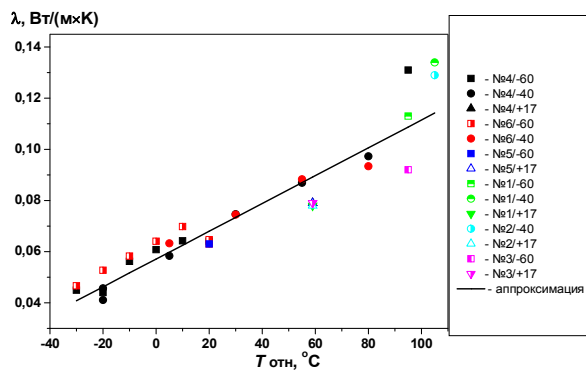


Рис. 3. Зависимости эффективного коэффициента теплопроводности от температуры отнесения для диапазонов температур от -40 до +200 и от -60 до +100 °С полученные на 4 и 6 образцах. Прямая линия - аппроксимация $\lambda(T) = 0,05708 + 0,5437 T/1000$. №4/-60 – номер образца, начальная температура

Таблица 4

Результаты определения эффективной теплопроводности образца №1 с обкладками из углепластика УТО-4510+ЭДТ-69Э

№ опыта	Диапазон температур		Температура отнесения, $T_{отн}, ^\circ C$	λ , Вт/(м·К)
	$T_{окр}, ^\circ C$	$T_{осн}, ^\circ C$		
1	18	50	34	0,055
2	15	50	38	0,062
3	12	100	56	0,097
4	13	100	57	0,092
5	16	150	83	0,092
6	20	150	85	0,095
7	14	200	107	0,105
8	12	200	106	0,107
9	21	250	136	0,107

На рисунке 4 показаны результаты испытаний образцов сотовых конструкций с обкладками из углепластика УТО. Максимальное отклонение от прямой не превышает 6 %.

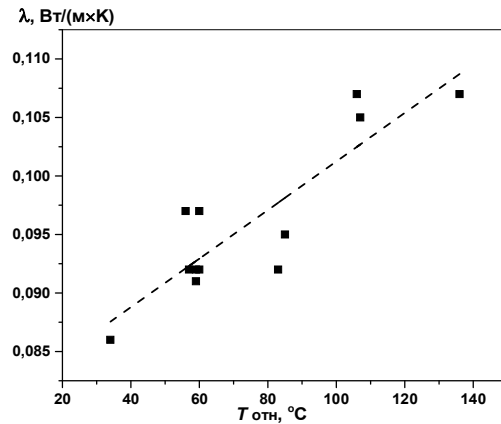


Рис. 4. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры отнесения для диапазона температур от ~10 до +250 °С, полученные на образце №1: точки – эксперимент, пунктирная прямая аппроксимация: $\lambda(T) = 0,0805 + 0,208T/1000$

На рисунке 5 приведены результаты определения эффективной теплопроводности при давлении окружающей ~10⁻¹ Па для образцов с обкладками из углепластика ЛУП. Несмотря на сравнительно большой разброс полученных результатов (до 20%) они с удовлетворительной точностью аппроксимируются прямой линией.

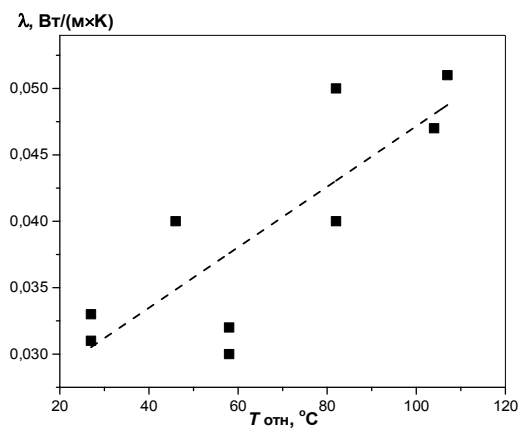


Рис. 5. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температуры отнесения для диапазона температур от 10 до +250 °С, полученные на 4 образце при давлении ~10⁻¹Па. Точки – эксперимент, пунктирная прямая – аппроксимация

Таким образом, все полученные значения эффективного коэффициента теплопроводности аппроксимируются прямыми с погрешностью, не пре-

вышающей 20%. При этом значения, полученные при давлении $\sim 10^{-1}$ Па более чем в два раза ниже значений при давлении 10^5 Па (рис. 6).

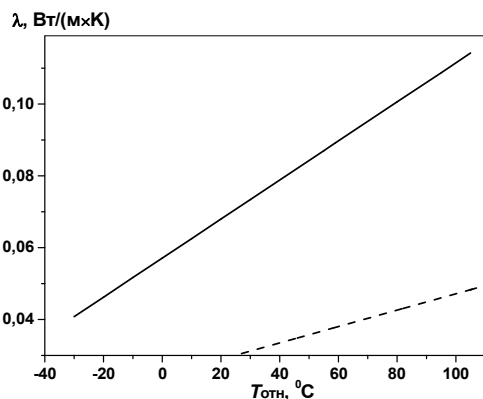


Рис. 6. Сравнение аппроксимаций эффективного коэффициента теплопроводности для образца №4 с обкладками из углепластика ЛУП-0,1+ЭДТ-69У, полученного при давлениях 105 и $\sim 10^{-1}$ Па:
сплошная прямая – 105 Па,
штрих-пунктирная – $\sim 10^{-1}$ Па

Таблица 5

Результаты определения эффективной теплопроводности образцов с обкладками из углепластика ЛУП-0,1+ЭДТ-69У при давлении $\sim 10^{-1}$ Па

№ опыта	Диапазон температур		Температура отнесения, T _{отн} , °C	λ, Вт/(м·К)
	T _{окр} , °C	T _{осн} , °C		
1	7	200	104	0,047
2	14	200	107	0,051
3	13	150	82	0,050
4	13	150	82	0,040
5	16	100	58	0,030
6	15	100	58	0,032
7	12	80	46	0,040
8	4	50	27	0,031
9	4	50	27	0,033

Определение теплоемкости сотовой конструкции при атмосферном давлении

Для определения теплоемкости образцов с обкладками из углепластиков ЛУП и УТО можно использовать аддитивный метод, т. е. теплоемкость всей конструкции образца приравнивается сумме теплоемкостей отдельных его частей (обкладка 1, обкладка 2 и сотовый наполнитель) пропорционально их относительной массе:

$$c_0 = c_1 \frac{m_1}{M} + c_2 \frac{m_2}{M} + c_3 \frac{m_3}{M}, \quad (2)$$

где m_1, m_2 и m_3 – масса первой, второй обкладок образца и сотового наполнителя соответственно; c_1, c_2 и c_3 – удельные теплоемкости материалов первой, второй обкладок образца и сотового наполнителя соответственно; M – общая масса образца, определяемая по формуле:

$$M = m_1 + m_2 + m_3. \quad (3)$$

Однако для такого расчета необходимо определить геометрические размеры и массу каждого элемента конструкции.

В таблице 6 представлены измеренные и расчетные значения геометрических размеров и массы трех элементов: обкладки 1, обкладки 2 и сот, для $\varnothing 100$ мм, равного диаметру теплоприемника.

Сравнение измеренной и расчетной массы на образцах №5 (0,038 кг) для ЛУП и №6 (0,056 кг) для УТО (см. табл. 6) показывает удовлетворительное совпадение, тем более что при расчетах не учитывался вес клея, соединяющего обкладки и сотовый наполнитель.

Аналогичные расчеты были выполнены для всех образцов. Массовая теплоемкость обкладок и сотового наполнителя, необходимые для расчета по (2) от -40°C до $+220^\circ\text{C}$, определялась на установке ИТ-с-400 [3].

Таблица 6

Расчетные и измеренные размеры и масса образцов для $\varnothing 100$ мм, принятые при расчете теплоемкости по аддитивному методу

Толщина образца и его составляющих (изм.), м			
Наименование	ЛУП	УТО	Соты
Образец	0,0256	0,0269	0,023
Обкладка 1	0,0012	0,0019	
Обкладка 2	0,0012	0,0018	
Рассчитанный объем образца и его составляющих, м ³			
Образец	0,000201062	0,000211272	0,0001806
Обкладка 1	9.42478E-06	1.49226E-05	
Обкладка 2	9.42478E-06	1.41372E-05	
Плотность образца и его составляющих, кг/м ³			
Образец	178	236	45
Обкладка 1	1400	1393	
Обкладка 2	1400	1393	
Рассчитанная масса образца для диаметра 100 мм, кг			
Обкладка 1	0,013	0,021	0,009
Обкладка 2	0,013	0,020	
Образец	0,036	0,050	

^{*)} Примечание: плотности обкладок и сот представлены ГП «КБ «Ожное», а плотности образцов рассчитывалась, исходя из расчетной массы и объема.

Кроме того, было проведено сравнение полученных результатов с расчетом через температуропроводность образцов всей сотовой конструкции. Для оценки температуропроводности образцов использовались закономерности автомоделного режима прогрева [4]. Эксперименты проводились для образцов: ЛУП - №4 и УТО - №1. Полученные результаты представлены в табл. 8.

Таблица 7

Результаты определения удельной теплоемкости образцов сотовых конструкций с обкладками из углепластика в диапазоне температур от минус 40 до 220 °С аддитивным методом

№ п/п	Температура, °С	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	
		ЛУП	УТО
1	2	3	4
1	-40	779	1041
2	-20	773	1040
3	0	784	1054
4	20	814	1083
5	30	835	1102
6	50	925	1153
7	60	996	1183
8	70	1068	1217
9	80	1142	1256
10	90	1215	1297
11	100	1290	1343
12	110	1407	1420
13	120	1479	1469
14	130	1522	1505
15	140	1546	1527
16	150	1552	1536
17	160	1535	1532
18	170	1489	1509
19	180	1481	1517
20	190	1478	1531
21	200	1471	1546
22	220	1449	1575

Таблица 8

Сравнение теплоемкостей образцов сотовых конструкций, рассчитанных аддитивным методом (2) и с помощью температуропроводности по (1), измеренной на установке УТХНМ

Материал	Режим, °С ($T_{окр} \sim 20^\circ\text{C}$)	$T_{отн},$ °С	$c_o,$ Дж/(кг·К)	
			Расчет по (1)	Расчет по (2)
ЛУП, №4	200	110	1407	1488
	250	135	1534	1319
УТО, №1	200	110	1420	1463
	250	135	1516	1580

Как видно из этой таблицы максимальное расхождение не превышает 15 %.

Была выполнена оценка погрешности измерений при доверительной вероятности 0,95, для режимов, у которых было не меньше 4-5 экспериментов.

Результаты приведены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты оценки погрешности определения эффективного коэффициента теплопроводности для образцов с обкладками УТО и ЛУП

Материал, обкладка	Диапазон температур, °С		Значение, Дж/(кг·К)	Погрешность, %
	$T_{глав}$	$T_{окр}$		
УТО	+50	-10	0,071 $\pm 0,0084$	11,5
УТО	+100	20	0,085 $\pm 0,0086$	10,1
ЛУП	+100	20	0,079 $\pm 0,0087$	1,1
ЛУП	+250	-60	0,105 $\pm 0,0084$	1,7

Заключение

Определена эффективная теплопроводность и теплоемкость для образцов сотовых конструкций в диапазоне температур от - 60 до +250 °С.

Установлено, что для всех режимов нагрева эффективная теплопроводность образцов сотовых конструкций аппроксимируется линейной зависимостью с погрешностью, не превышающей 20 %.

Показано, что теплоемкость, определенная аддитивным методом, согласуется с теплоемкостью, рассчитанной через температуропроводность (закономерность автомоделного режима прогрева), с погрешностью не более 15%.

Литература

1. Исследование установки для определения тепло-и температуропроводности при моделировании некоторых факторов космического пространства [Текст] / Г. А. Фролов, Д. В. Боровик, А. Д. Колотило [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 2. – С. 9–15.
2. ГОСТ 21523.31- 93. Межгосударственный стандарт. Древесина модифицированная. Измерение теплоемкости [Текст] ; введ. 01.01.1995. – М. : Изд-во стандартов, 1995. – 6 с.
3. Определение теплофизических характеристик материалов головного обтекателя в рабочем диапазоне температур [Текст] / Наука для космической промышленности : Информационный бюллетень Координационного совета по организации совместных работ ГП «КБ «Южное» и научных учреждений НАН Украины. – ГП «КБ «Южное» и НАН Украины, 2014. – № 1-2. – С. 30– 31.
4. Полежаев, Ю. В. Тепловое разрушение материалов [Текст] / Ю. В. Полежаев, Г. А. Фролов / под ред. акад. НАН Украины В. В. Скорохода. – К. : ИД «Академперіодика», 2006. – 354 с.

Поступила в редакцию 9.06.2015, рассмотрена на редколлегии 22.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. отделом Л. Р. Вишняков, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗРАЗКІВ СТІЛЬНИКОВИХ КОНСТРУКЦІЙ В ДІАПАЗОНІ ТЕМПЕРАТУР -60 ... + 250 ° С І ТИСКУ ВІД 10⁵ ДО 10⁻¹ Па

*Г. О. Фролов, Д. В. Боровик, О. Д. Колотило, О. Л. Ламеко, Е. В. Олігов,
О. В. Панич, О. М. Потапов, В. Г. Тихий, І. О. Гусарова*

На установці для випробування теплофізичних характеристик низькотеплопровідних матеріалів були визначені ефективні теплофізичні характеристики (теплопровідність і теплоємність) стільникових конструкцій в діапазоні температур від мінус 60 до + 250 °С при тиску від 10⁵ до 10⁻¹ Па. Установка дозволяє визначити тепло-і температуропровідність на зразках діаметром 120 мм і товщиною до 30 мм. Вимірювання проводяться в нестационарному режимі при постійній температурі поверхні, яка забезпечується спеціальною системою контролю і управління. Встановлено, що для всіх режимів нагріву ефективна теплопровідність зразків стільникових конструкцій апроксимується лінійною залежністю з похибкою, що не перевищує 20%.

Ключові слова: стільникова теплоізоляція, ніхромовий нагрівач, автотельний режим, активний захист, фактори космічного простору, теплоприймач, термопара, вимірювальна комірка.

IDENTIFICATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF HONEYCOMB STRUCTURE SAMPLES WITHIN TEMPERATURE RANGING BETWEEN -60 AND + 250 °C AND UNDER PRESSURE BETWEEN 10⁵ TO 10⁻¹ Pa

*G. A. Frolov, D. V. Borovik, A. D. Kolotilo, A. L. Lameko, E. V. Oligov,
A. V. Panich, A. M. Potapov, V. G. Tykhyu, I. A. Gusarova*

Effective thermophysical properties (thermal conductivity and thermal capacity) of honeycomb structures were identified at the installation designed to measure thermophysical properties of low-conductivity materials, within temperature ranging from minus 100 to 250 °C and under pressure from 10⁵ to 10⁻¹ Pa. The installation allows for measuring thermal and temperature capacity on samples of 120 mm in diameter and of up to 30 mm in thickness. Measurements are taken in a non-stationary mode at a constant surface temperature ensured by a special monitoring and operation system. It has been established that for all heating modes, effective thermal conductivity of honeycomb structure samples can be approximated with linear dependence with an error not rising over 20%.

Key words: honeycomb thermal insulation, nichrome heater, automodel regime, active protection, space factors, heat receiver, thermocouple, measuring cell.

Фролов Геннадий Александрович – д-р техн. наук, зав. отделом высокотемпературных процессов и испытаний материалов ракетно-космической техники, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, e-mail: g_frolov@ukr.net.

Боровик Дмитрий Валерьевич – мл. науч. сотр. отдела высокотемпературных процессов и испытаний материалов ракетно-космической техники, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, e-mail: dmitry_list@list.ru.

Колотило Александр Данилович – науч. сотр. отдела высокотемпературных процессов и испытаний материалов ракетно-космической техники, Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев, e-mail: g_frolov@ukr.net.

Ламеко Александр Львович – директор, ГП «НПЦ «Энергоимпульс» Института электродинамики НАН Украины, Киев, e-mail: lameko@nbi.com.ua.

Олигов Евгений Владимирович – инж.-электроник, ГП «НПЦ «Энергоимпульс» Института электродинамики НАН Украины, Киев, e-mail: oligov@sa.org.ua.

Панич Алексей Валерьевич – вед. инженер, ГП «НПЦ «Энергоимпульс» Института электродинамики НАН Украины, Киев, e-mail: panamail@ukr.net.

Потапов Александр Михайлович – канд. техн. наук, нач. комплекса новых материалов и перспективных технологий, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Тихий Виктор Григорьевич – канд. техн. наук, нач. отд., Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.

Гусарова Ирина Александровна – нач. группы, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М. К. Янгеля», Днепропетровск, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com.