



**Мануйлов К. К.**

Исследование  
теплофизических и  
механических характеристик  
композитных материалов  
экранны-вакуумной  
теплоизоляции

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Мануйлов К. К. Исследование теплофизических и механических характеристик композитных материалов экранно-вакуумной теплоизоляции // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 53. 16 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-53>

**Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ  
имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук**

**К.К. Мануйлов**

**Исследование теплофизических  
и механических характеристик  
композитных материалов  
экранны-вакуумной теплоизоляции**

**Москва — 2015**

УДК:536.21: 536.48

*Мануйлов К.К.*

**Исследование теплофизических и механических характеристик композитных материалов экранно-вакуумной теплоизоляции**

В процессе подготовки эксперимента "Термофоб" проекта ФОБОС-ГРУНТ проведено исследование теплофизических и механических характеристик ряда композитных теплоизоляционных материалов. Анализ данных проводится на основе теории лучистого теплопереноса и представлений о механизме вакуумного контактного теплообмена.

**Ключевые слова:** ЭВТИ, композитные материалы, криогенная техника, космическое приборостроение, калориметрия, ИПМ им. М.В.Келдыша

*Konstantin Konstantinovich Manuilov*

**Thermal characteristics investigation of multilayer insulation domestic materials**

Investigation of heat insulation composites thermal and mechanical properties was performed during the preparation of "Themofob" experiment (Phobos-Grunt project). The obtained data analysis implies the radiation theory as well as vacuum contact heat transfer modern concept.

**Key words:** MLI, composite materials, cryogenic technique, space technique, calorimetry, Keldysh Institute

## Оглавление

1. Предмет исследования.....	3
2. Компоненты и образцы ЭВТИ.....	4
3. Калориметрические исследования.....	5
4. Исследования упругих свойств ЭВТИ.....	7
5. Анализ данных.....	9
6. Обоснование регрессионных гипотез.....	10
7. Результаты.....	11
Литература.....	16

## 1. Предмет исследования

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ), западный термин MLI (от multilayer thermal insulation) используется в криогенной и высокотемпературной вакуумной технике, космическом приборостроении. Принцип действия ЭВТИ основан на уменьшении поперечного теплообмена в многослойных анизотропных средах с чередующимися отражающими и теплоизоляционными слоями.

Под теплопроводностью ЭВТИ обычно понимается нормальная к поверхности раздела компонента тензорного соотношения Фурье.

**Контактная теплопроводность**  $\lambda_c$  разделительных прокладок нелинейно растёт с увеличением плотности укладки (универсальной температурной зависимости контактной теплопроводности  $\lambda_c$  в литературе не отмечено (Каганер, 1966)).

**Лучистая теплопроводность**  $\lambda_r$  уменьшается с увеличением количества экранов на единицу длины (плотности укладки). Температурная зависимость лучистой теплопроводности при малых перепадах температуры  $\Delta T$  описывается соотношением  $\lambda_r \sim T^3 \Delta T$ .

Таким образом, зависимость поперечной теплопроводности  $\lambda = \lambda_r + \lambda_c$  от плотности укладки ЭВТИ имеет характерный минимум. Его определение и является основной задачей оптимизации теплоизоляции.

Соотношение вклада механизмов контактного и лучистого теплопереноса изменяется на порядок уже в диапазоне температур  $-196 \dots 150$  °С. По этой причине расчет характеристик составной многокомпонентной теплоизоляции



Рис. 1. Примеры составной многокомпонентной теплоизоляции

(рис. 1) приближен и зачастую расходится с экспериментом. На практике в связи со сложностью построения модели теплопереноса в композитных средах зачастую используется экспериментальный метод подбора теплозащиты.

В данной работе предпринята попытка отдельного определения вклада описанных каналов теплопереноса. Особенностью авторского подхода является использование сжимающего стопу давления вместо употребительного параметра плотности укладки. Это позволило сравнить данные, относящиеся к разным наборам ЭВТИ.

## 2. Компоненты и образцы ЭВТИ

Отечественная промышленность выпускает широкий ассортимент материалов ЭВТИ для использования в диапазоне рабочих температур от 4 до 1000 °К. Для умеренных температур (до 150 – 300 °С) обычно применяются пленочные экраны из полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) или полиимидной (ПИ) подложки с односторонним (ОА) или двусторонним (ДА) алюминиевым напылением. При повышенных температурах используются экраны из алюминиевой (А) или никелевой (Н) фольги. Экраны, как правило, разделяются теплоизолирующими прокладками из стекловуали или кварцевого холста. В ряде случаев экраны подвергаются рифлению для уменьшения плотности укладки. Технические характеристики некоторых компонентов отечественных типов ЭВТИ приводятся в табл. 1.

**Характеристики компонентов ЭВТИ**

*Таблица 1*

Экраны	Толщина $H$ , мкм	Плотность $D$ , г/м <sup>2</sup>	$T_{\max}$ , °С
ПЭТФ-ОА	5	7,65	150
ПЭТФ-ДА	5	7,79	150
ПИ-1Э-ОА	12 ... 20	16 ... 25	300
ПИ-1Э-ДА	12 ... 20	16 ... 25	300
А5М	10 ... 20	27 ... 54	500
НВЗВ	5-8	70	1000
Прокладки	Толщина $H$ , мкм	Плотность $D$ , г/м <sup>2</sup>	$T_{\max}$ , °С
ЭВТИ-7	50	7	300
ХКВ-0,04	50	12	1000
ХКВ-0,1	100	24	1000

Для исследования теплоизолирующих характеристик мы отобрали двенадцать образцов с различным сочетанием компонентов ЭВТИ (табл. 2).

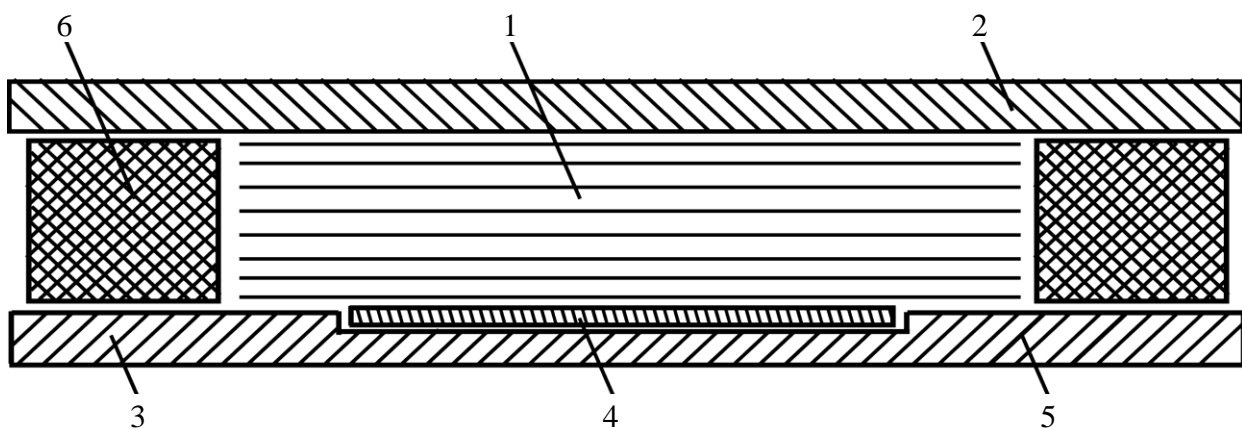
Состав калориметрических образцов ЭВТИ

Таблица 2

Образец	Экран	Рифление	Прокладка
1	ПЭТФ-ОА	нет	ЭВТИ-7
2	ПЭТФ-ДА	нет	ЭВТИ-7
3	ПЭТФ-ОА	да	нет
4	ПЭТФ-ДА	да	нет
5	ПЭТФ-ОА	да	ЭВТИ-7
6	ПЭТФ-ДА	да	ЭВТИ-7
7	A5M	нет	ЭВТИ-7
8	A5M	нет	ЭВТИ-7
9	A5M	нет	ЭВТИ-7
10	A5M	нет	ЭВТИ-7
11	НВЗВ	нет	ХКВ-0,04
12	НВЗВ	нет	ХКВ-0,1

### 3. Калориметрические исследования

Исследования образцов ЭВТИ проводились в ИПМ РАН на плоском калориметре. Достаточно сложная конструкция установки (рис. 2) рассчитана на измерение весьма малых тепловых потоков в условиях вакуума. С этой целью калориметр помещался в вакуумную камеру. Диффузионным насосом воздух откачивался до давления менее  $10^{-5}$  мм рт. ст. В этих условиях влиянием молекулярного теплопереноса можно пренебречь. Процесс дегазации и десорбции воды с поверхности ЭВТИ контролировался по долговременной кинетике установления показаний калориметра.



**Рис. 2.** Принципиальная схема калориметра для определения теплопроводности плоских образцов ЭВТИ: 1 – образец ЭВТИ; 2 – холодная стенка ( $T_1$ ); 3 – теплая стенка ( $T_2$ ); 4 – контрольный нагреватель; 5 – компенсирующий нагреватель; 6 – охранная система.

Тепловой поток  $P$  определялся в стационарном режиме по мощности, подводимой к контрольному нагревателю площадью  $S_r$ , а теплопроводность  $\lambda$  образца толщиной  $h = 1$  см рассчитывалась по формуле  $\lambda = P/h S_r (T_2 - T_1)$ .

В табл. 3 приведены данные измерений коэффициента теплопроводности образцов ЭВТИ при свободной укладке в зависимости от температуры. В табл. 4 приводятся значения теплопроводности образцов ЭВТИ в зависимости от плотности укладки слоев  $n$ . Оценка относительной погрешности измерений  $\lambda$  составляет 10%.

**Теплопроводность ЭВТИ при свободной укладке** *Таблица 3*

№ образца	n, 1/см	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$			$\lambda \cdot 10^5$ , ккал/(м·час·град)		
			50	100	150	25	32	39
1	30	20	50	100	150	25	32	39
2	30	20	50	100	150	19	25	30
3	14	20	50	100	150	28	35	42
4	14	20	50	100	150	18	23	28
5	13	20	50	100	150	22	30	35
6	13	20	50	100	150	12	15	21
7	30	150	200	300	–	22	29	–
8	30	150	400	500	–	37	48	–
9, 10	18	150	300	400	500	55	70	95
11	11	500	800	900	1000	1110	1350	1780
12	11	500	600	700	800	630	820	1100

**Теплопроводность уплотненной ЭВТИ**

*Таблица 4*

№ образца	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10^5$ , ккал/(м·час·град) при плотности укладки $n$ , 1/см				
			10	20	30	40	50
1	-196	20	–	–	7	7	7
2			–	–	5	5	5
3			10	12	17	20	22
4			6	9	14	18,5	22
5			7	4	5	7	9
6			4,5	3,5	4,5	7	9
7, 8	-196	20	–	–	5,5	7	9
9, 10			16	14	15	20	25
11, 12			6	14	18	24	28

#### 4. Исследования упругих свойств ЭВТИ

При построении модели теплопереноса, согласующейся с результатами калориметрических измерений, необходимо учесть то, что в выбранных образцах ЭВТИ использован ограниченный набор материалов экранов и прокладок. Поэтому сопоставление результатов измерений для различных образцов является важным источником дополнительной информации. Естественный подход здесь связан с переходом от плотности укладки  $n$  к сжимающему давлению  $p$ .

Результаты измерения плотности укладки образцов ЭВТИ в зависимости от давления приведены в табл. 5.

Упругие свойства ЭВТИ

Таблица 5

№ образца	Сжимающая нагрузка $p$ , кгс/см <sup>2</sup>								
	0	0,01	0,02	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	1
	Плотность укладки $n$ , 1/см								
1, 2	20	110	125	140	155	180	190	240	280
3, 4	12	115	140	145	195	315	450	455	500
5, 6	8	75	85	100	115	155	195	240	250
7, 8	30	90	95	105	125	135	155	170	200
9, 10	6	40	45	60	65	80	100	125	170
11	8	30	40	45	50	55	70	–	–
12	12	35	53	65	73	85	113	120	–

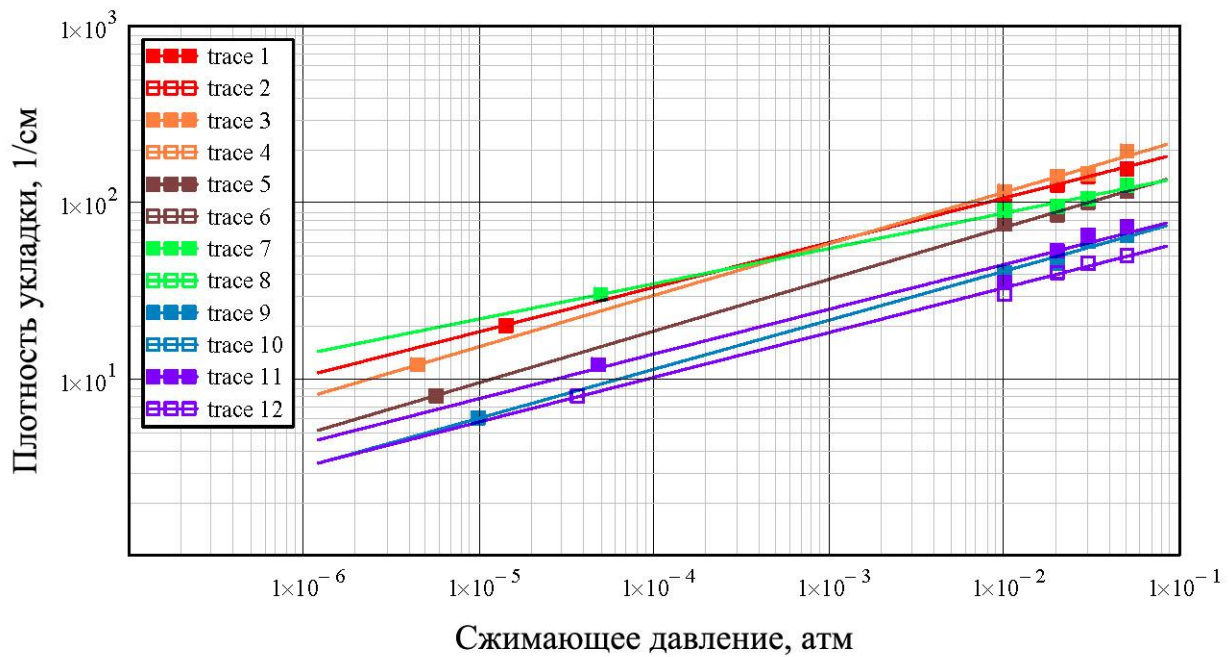
В случае свободной укладки (при отсутствии сжимающей нагрузки) давление в стопе не равно нулю, а обусловлено весом вышерасположенной части стопы. Локальное давление, а с ним и местное значение теплопроводности зависит от положения экрана. Безразмерный параметр модели  $\gamma = 0,5$  соответствует положению уровня, на котором связываются средние значения теплопроводности и давления.

На рис. 3. приведены экспериментальные данные и результаты аппроксимации зависимостей  $n(p)$  для образцов ЭВТИ в диапазоне давлений  $P = 10^{-6} - 10^{-1}$  атм. Для аппроксимации мы использовали степенную зависимость (1), предложенную в работе (Каганер, 1966).

$$n(p) = n_0 \left( \frac{p}{p_0} \right)^\beta, \quad n_0 = n(p_0). \quad (1)$$

В табл. 6. приводятся значения показателя  $\beta$  зависимости (1). Плотность укладки  $n_0$  соответствует реперному давлению  $p_0 = 10^{-3}$  атм. Значения  $\beta$  для





**Рис. 3.** Зависимость плотности укладки слоёв ЭВТИ от давления. Номера образцов указаны в легенде на поле графика.

различных образцов находятся в диапазоне  $\beta = 0,2 - 0,3$ , хорошо согласуясь со значением  $\beta = 0,2 - 0,25$  (Каганер, 1966).

**Параметры аппроксимации зависимости  $n(p)$**

*Таблица 6*

Образец	$n_0$	$\beta$	Образец	$n_0$	$\beta$
1	59,1	0,25	7	54,8	0,20
2	59,1	0,25	8	51,3	0,22
3	58,2	0,29	9	21,4	0,28
4	58,1	0,29	10	20,0	0,30
5	36,6	0,29	11	24,7	0,25
6	36,6	0,29	12	18,2	0,25

## 5. Анализ данных

Пусть мы имеем выборку из  $n$  точек  $\{X_k, Y_k\}$  ( $k=1, \dots, n$ ), заданных с погрешностью  $\Delta Y_k \neq 0$ , отличающейся от точки к точке. Регрессией называется аппроксимация данных  $Y_k$  суперпозицией  $y(X_k) = a_1 F_1(X_k) + a_2 F_2(X_k)$  гипотез  $F_1(X_k)$  и  $F_2(X_k)$ . Задача сводится к определению коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$  из условия минимизации функционала невязки

$$\sum_{k=1}^n \frac{(y(X_k) - Y_k)^2}{\Delta Y_k^2} = \min(a_1, a_2). \quad (2)$$

Дифференцирование (2) по коэффициентам  $a_1$  и  $a_2$  приводит к системе уравнений (3) с решением (4)

$$\frac{d}{da_1} \left( \sum_{k=1}^n \frac{(y(X_k) - Y_k)^2}{\Delta Y_k^2} \right) = 0, \quad \frac{d}{da_2} \left( \sum_{k=1}^n \frac{(y(X_k) - Y_k)^2}{\Delta Y_k^2} \right) = 0. \quad (3)$$

$$a_1 = \frac{\overline{F_2 Y} \cdot \overline{F_1 F_2} - \overline{F_1 Y} \cdot \overline{F_2 F_2}}{\overline{F_1 F_2} \cdot \overline{F_1 F_2} - \overline{F_1 F_1} \cdot \overline{F_2 F_2}}, \quad a_2 = \frac{\overline{F_1 Y} \cdot \overline{F_1 F_2} - \overline{F_2 Y} \cdot \overline{F_1 F_1}}{\overline{F_1 F_2} \cdot \overline{F_1 F_2} - \overline{F_1 F_1} \cdot \overline{F_2 F_2}}. \quad (4)$$

Здесь

$$\overline{F_1 Y} = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(X_k) Y_k}{\Delta Y_k^2}, \quad \overline{F_2 Y} = \sum_{k=1}^n \frac{F_2(X_k) Y_k}{\Delta Y_k^2},$$

$$\overline{F_1 F_1} = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(X_k) F_1(x_k)}{\Delta Y_k^2}, \quad \overline{F_1 F_2} = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(X_k) F_2(X_k)}{\Delta Y_k^2}, \quad \overline{F_2 F_2} = \sum_{k=1}^n \frac{F_2(X_k) F_2(X_k)}{\Delta Y_k^2},$$

Оценка погрешности определения весовых коэффициентов  $a_1$  и  $a_2$ :

$$\Delta a_1 = \frac{\sqrt{F_2^2 \Delta Y^2 \cdot (\overline{F_1 F_2})^2 - \overline{F_1^2 \Delta Y^2} \cdot (\overline{F_2 F_2})^2}}{|\overline{F_1 F_2} \cdot \overline{F_1 F_2} - \overline{F_1 F_1} \cdot \overline{F_2 F_2}|}, \quad (5)$$

$$\Delta a_2 = \frac{\sqrt{F_1^2 \Delta Y^2 \cdot (\overline{F_1 F_2})^2 - \overline{F_2^2 \Delta Y^2} \cdot (\overline{F_1 F_1})^2}}{|\overline{F_1 F_2} \cdot \overline{F_1 F_2} - \overline{F_1 F_1} \cdot \overline{F_2 F_2}|},$$

где

$$\overline{F_1^2 \Delta Y^2} = \sum_{k=1}^n F_1(X_k) F_1(X_k), \quad \overline{F_2^2 \Delta Y^2} = \sum_{k=1}^n F_2(X_k) F_2(X_k).$$

## 6. Обоснование регрессионных гипотез

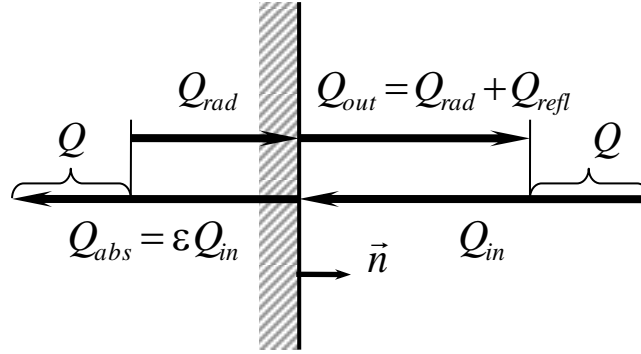


Рис. 4

**Лучистый теплообмен.** Рассмотрим баланс потоков энергии на границе серого тела (рис. 4). Тепловой поток  $Q_{abs}$ , поглощенный поверхностью тела с коэффициентом поглощения  $\varepsilon$  (рис. 4), возвращается в систему в виде теплового излучения  $Q_{rad}$  и через границу переносится поток  $Q = Q_{rad} - Q_{abs} = Q_{out} - Q_{in}$  в сторону внешней нормали  $\vec{n}$ . Возвратный лучистый поток  $Q_{out}$  равен

$$Q_{out} = Q + Q_{in} = Q + \frac{1}{\varepsilon} Q_{abs} = Q + \frac{1}{\varepsilon} (Q_{rad} - Q) = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) Q + \frac{1}{\varepsilon} Q_{rad}.$$

Для системы из двух протяженных параллельных поверхностей 1 и 2 с площадью  $S_1 = S_2 = S$  лучистый теплообмен задается условиями

$$Q_{out}^{(1)} = \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_1}\right) Q + \sigma S T_1^4 = Q_{in}^{(2)},$$

$$Q_{out}^{(2)} = \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right) Q + \sigma S T_2^4 = Q_{in}^{(1)}.$$

Здесь  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-12} \text{ Втсм}^{-2} \text{ К}^{-4}$  – постоянная Стефана-Больцмана. Поскольку поток от поверхности 1 к 2 равен  $Q = Q_{out}^{(1)} - Q_{in}^{(1)} = Q_{in}^{(2)} - Q_{out}^{(2)}$ , имеем

$$Q = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} \sigma S (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

Формулу (6) можно получить, рассматривая лучистый перенос как совокупность стохастических процессов рождения и поглощения квантов излучения на границах тел 1 и 2 с вероятностями  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ . Произведение  $P = \varepsilon_1 \varepsilon_2$  является вероятностью переноса тепла. Величина  $R = 1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2$

определяет вероятность гибели кванта при отражении. Из определения условной вероятности отношение  $P/R$  является вероятностью переноса тепла от тела 1 к телу 2 с учетом отражений.

Таким образом, гипотеза для зависимости лучистой теплопроводности  $\lambda_r$  от плотности укладки  $n$  при  $n \gg 1$  имеет вид

$$\lambda_r(T_A, T_B, n) = \frac{\varepsilon \sigma}{n(2-\varepsilon)} (T_A^2 + T_B^2)(T_A + T_B) = \frac{F(T)}{n}. \quad (7)$$

**Контактный теплообмен.** Для зависимости контактной теплопроводности  $\lambda_c$  от плотности укладки была предложена зависимость (Каганер, 1966), аналогичная (1)

$$\lambda_c(p) = \lambda_c(p_0) \left( \frac{p}{p_0} \right)^\delta, \quad (8)$$

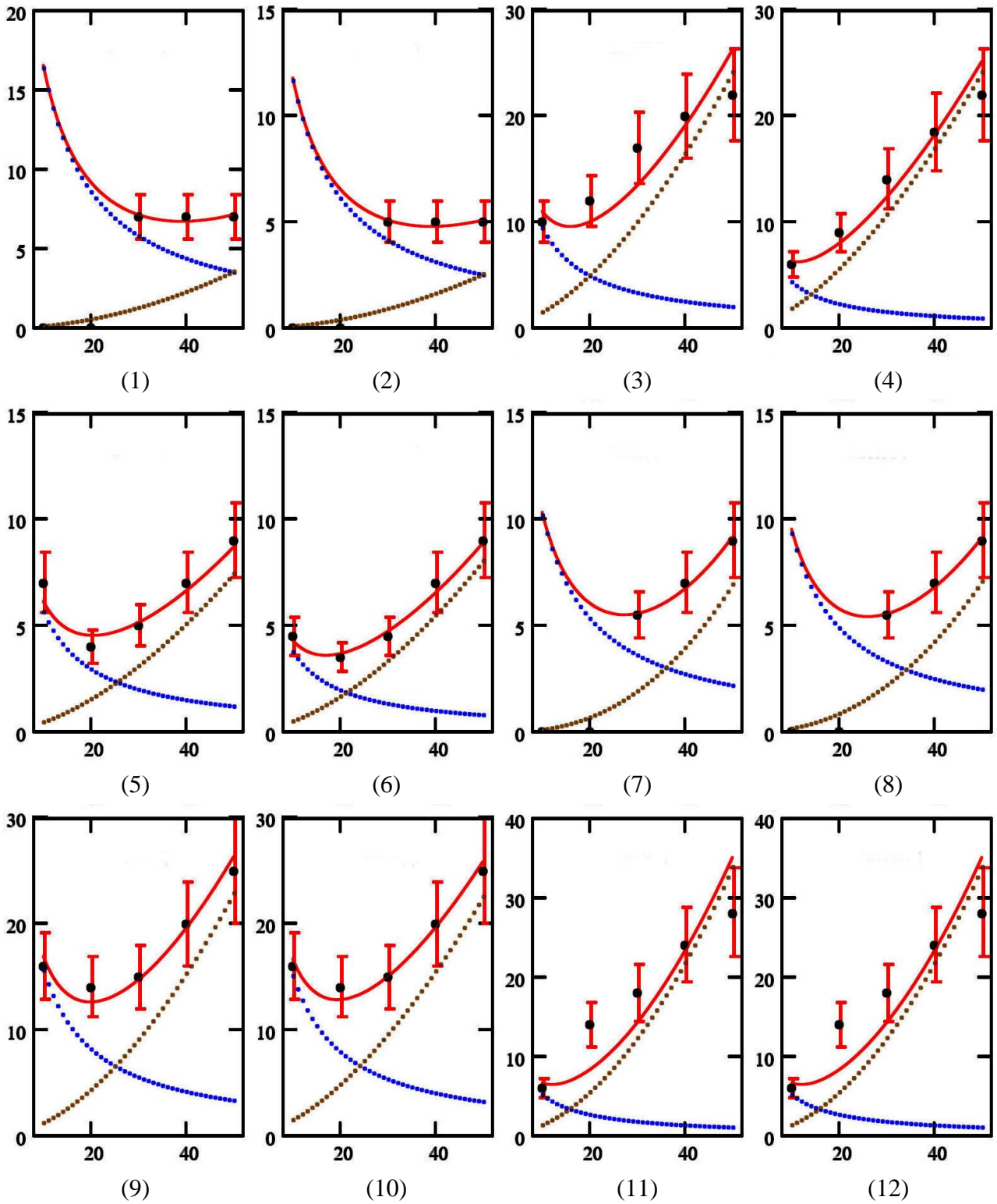
С учетом (1) получаем явную зависимость  $\lambda_c$  от плотности укладки

$$\lambda_c(n) = \lambda_c(n_0) \left( \frac{n}{n_0} \right)^{\delta-\beta}, \quad (9)$$

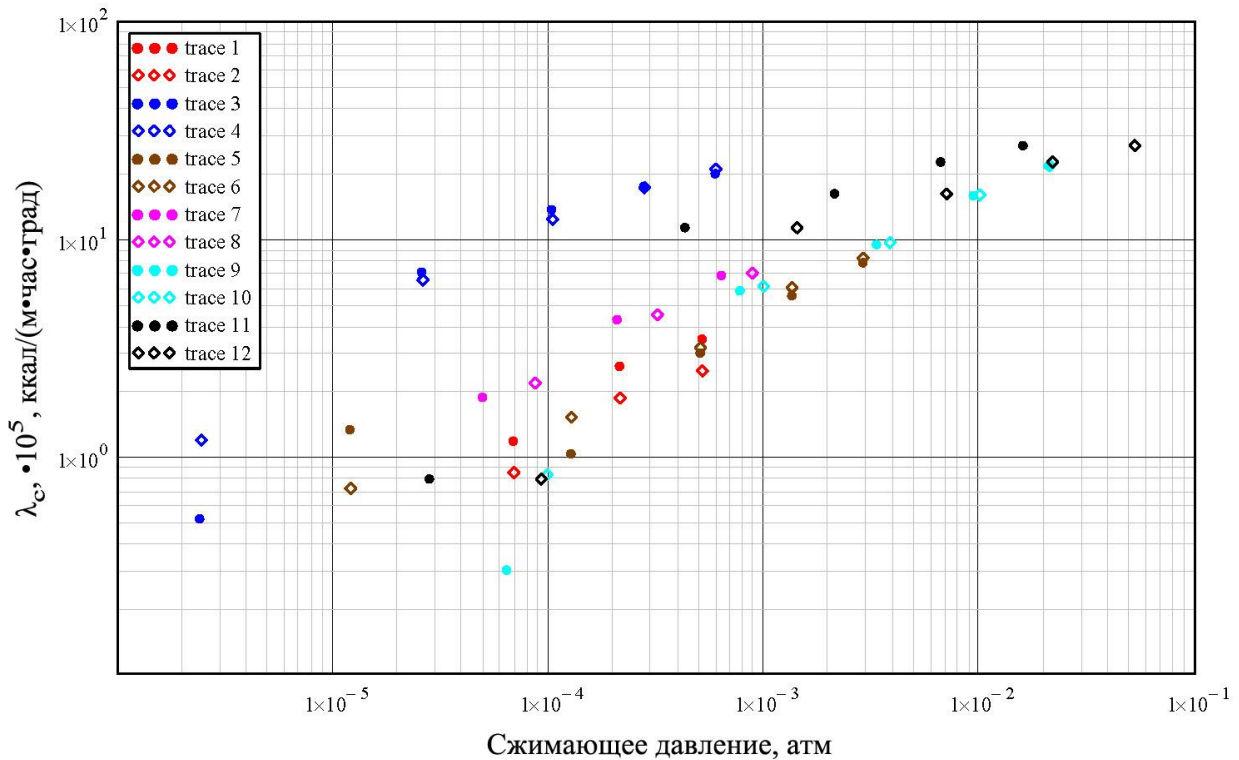
Целью работы являлась проверка самосогласованности гипотезы (9). Это означает, что для некоторого значения параметра  $\delta$  можно ожидать совмещения зависимостей  $\lambda_c(p)$  и  $\lambda_c(n)$ , полученных для разных образцов с одним материалом разделительных прокладок.

## 7. Результаты

Исследование проводилось на 12 образцах пленочных и фольговых ЭВТИ. В результате анализа исходных данных, представленных в табл. 5, для каждого варианта теплоизоляции получены соотношения эффективности лучистого и контактного механизмов теплопроводности и их изменение в зависимости от плотности укладки и температуры (рис. 5).



**Рис. 5.** Зависимость полной теплопроводности  $\lambda$  (•••) и её радиационной  $\lambda_r$  (•••) и контактной  $\lambda_c$  (•••) составляющих от плотности укладки слоёв ЭВТИ. Номера рисунков соответствуют номерам образцов.

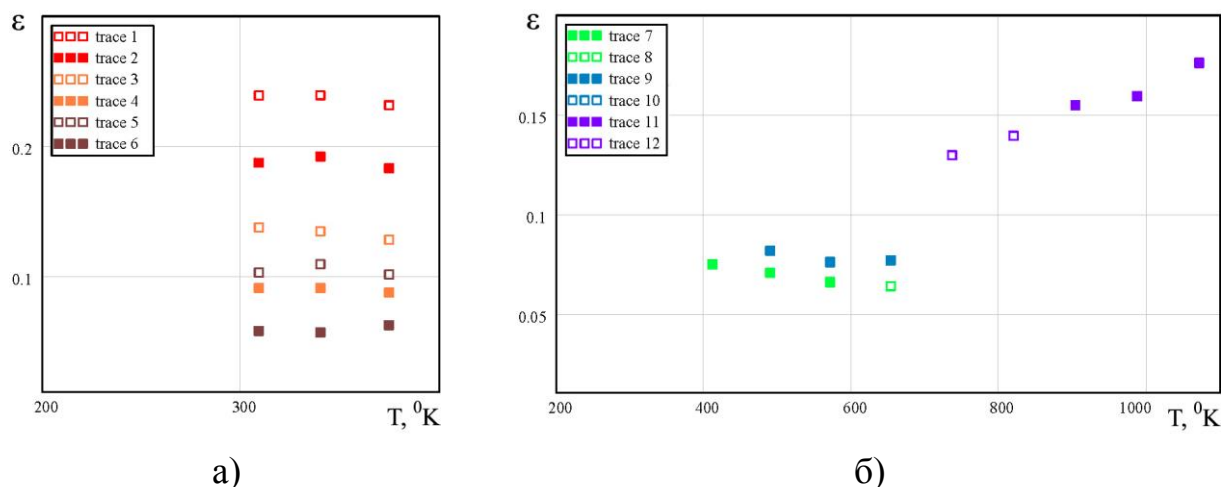


**Рис. 6.** Зависимость контактной теплопроводности образцов ЭВТИ от давления. Номера образцов указаны в легенде на поле графика.

**Контактная теплопроводность.** Сводный график зависимости контактной теплопроводности  $\lambda_c$  от сжимающего давления для образцов ЭВТИ различных типов представлен на рис. 6. Вид графиков иллюстрирует обоснованность гипотезы (9), давая близкое для всех материалов значение параметра  $\delta \approx 0,4-0,6$ .

Неожиданным результатом оказалось то, что зависимости  $\lambda_c(P)$  для ЭВТИ с разделителем из стекловуали и кварцевого холста оказались близкими.

Образцы без теплоизоляционной прокладки (№3 и №4) характеризуются на порядок большей контактной теплопроводностью, что вполне понятно. Тем не менее, и в этом случае параметр  $\delta$  близок к значению 0,5.



**Рис. 7.** Температурная зависимость коэффициентов черноты пленочных (а) и фольговых (б) ЭВТИ. Номера образцов указаны в легенде на поле графика.

**Лучистая теплопроводность.** Для определения коэффициента черноты отражающих экранов использовалась следующая методика.

Температура первого экрана полагается равной  $T_1$ . Температура  $T_i$   $i$ -го экрана  $i=2, \dots, n$  определяется рекуррентным путем при помощи соотношения баланса потоков лучистого и контактного переноса

$$\sigma \frac{\varepsilon}{2-\varepsilon} (T_i^4 - T_{i-1}^4) + \lambda_c \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} = \lambda \frac{T_2 - T_1}{1 \text{ см}}, \quad \Delta x = 1/n \quad (10)$$

Коэффициент черноты  $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$  определяется из соответствия температур  $T_{n+1} = T_2$  при заданном заранее коэффициенте контактной теплопроводности  $\lambda_c$ .

Для расчетов использовались данные табл. 2 и 3, соответствующие свободной укладке. Результаты расчетов на рис. 7 представлены графиками зависимости коэффициента черноты от средней яркостной температуры экранов

$$T_{\text{ср}} = \sqrt[4]{(T_A^4 + T_B^4)/2}.$$

Коэффициент черноты пленочных экранов оказался необычно большим. Только для образца №6 он приближается к значению 0,05 – 0,07, характерному для полированного алюминия в области длин волн 10 – 50 мкм.

Исследование выявило достоверное различие до 50% в коэффициенте черноты ЭВТИ с односторонним (образцы №1, 3, 5) и двухсторонним (№2, 4, 6) покрытием. Оба отмеченных эффекта, скорее всего, свидетельствуют о недостаточной толщине слоя алюминиевого напыления.

Температурная зависимость коэффициента черноты образцов №11 и 12 хорошо согласуется с известной зависимостью  $\varepsilon$  от длины волны для никеля.

\* \* \*

Проведено исследование теплофизических и механических свойств целого ряда модельных образцов экранно-вакуумной теплоизоляции. Регрессионный анализ разнородных экспериментальных данных позволил получить новые сведения о характере механизмов радиационного и контактного теплообмена в ЭВТИ.

Работа проведена в соответствии с планом научной работы отдела. Результаты исследования использованы при проектировании прибора Термофоб по проекту ФОБОС-ГРУНТ. С аналогичными задачами связана постановка теплофизических экспериментов по программам ЛУНА-ГЛОБ и ЛУНА-РЕСУРС (2017-2018 гг.)



## Литература

1. Жунь Г.Г., Гетманец В.Ф. Новые подходы к описанию процессов вакуумирования и газоотделения. Вопросы атомной науки и техники, 2002. №1. Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (12), с. 67-71.
2. Каганер М.Г. Тепловая изоляция в технике низких температур. М.: Машиностроение, 1966. 275 с.
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. (Первое изд. М.: Высшая школа, 1983. 463 с.)
4. Маров М.Я., Колесниченко А.В., Мануйлов К.К., Осипов В.П. Эксперимент Термофоб: прямые исследования теплофизических свойств грунта Фобоса. Астрономический вестник, 2010, т. 44, № 5, с. 1–9.
5. Мануйлов К.К. Активное тепловое зондирование грунта малых небесных тел. Метод, аппаратура, испытания // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, 2011, № 74. 19 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-74>