

# **ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ВОЛОКНИСТЫХ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ. II. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ**

**Д.П. Волков, кандидат технических наук, доцент.**

**Ю.П. Заричняк, доктор физико-математических наук, профессор.**

**Санкт-Петербургский национальный университет информационных технологий, механики и оптики.**

**Н.Н. Романов, кандидат технических наук, доцент.**

**Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Представлены результаты теоретического исследования теплопроводности ряда высокопористых волокнистых материалов, применяющихся в качестве тепловой и акустической изоляции корпусов, трубопроводов, противопожарных перегородок в авиационной, космической, судостроительной промышленности и ядерной энергетике.

*Ключевые слова:* теплопроводность, волокна, расчёт, композиционный материал, температура

## **HEAT CONDUCTION OF FIBROUS THERMAL PROTECTION MATERIALS. II. METHODS AND RESULTS OF CALCULATIONS**

D.P. Volkov; Yu.P. Zarichnyak.

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics.

N.N. Romanov.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Presents the results of theoretical investigation of thermal conductivity of a number of high-porous fibrous materials used as a thermal and acoustic insulation of buildings, pipelines, fire walls in aviation, space, shipbuilding and nuclear industry.

*Keywords:* heat conduction, fibers, calculation, composite material, temperature

### **Объекты исследования**

Волокнистые материалы представляют собой отдельный класс гетерогенных систем с характерными особенностями структуры. За редким исключением волокнистые материалы имеют искусственное происхождение, и поэтому их можно считать композиционными материалами (рис.).

Многообразие структур волокнистых материалов можно разделить на три основные группы, а именно:

– материалы с хаотическим распределением волокон в объёме (ваты, войлоки, очёсы и т.п.);

– композиционные материалы с упорядоченным плоским распределением волокон (ткани, маты, сетки, каркасы);

– композиционные материалы, представляющие собой различные комбинации хаотического и упорядоченного расположения слоёв волокнистого материала [1, 2].

## Модель структуры и методика расчёта

В данной работе исследуются материалы с хаотической структурой из минеральных волокон базальта и каолина, далее рассматривается структура именно таких материалов.

Расчёты теплопроводности указанных материалов будем проводить на модели волокнистой структуры с частичным разрывом поперечного сечения соприкасающихся волокон на условных плоскостях контакта, подробно рассмотренной в монографии Г.Н. Дульнева, Ю.П. Заричняка «Теплопроводность смесей и композиционных материалов» [2].

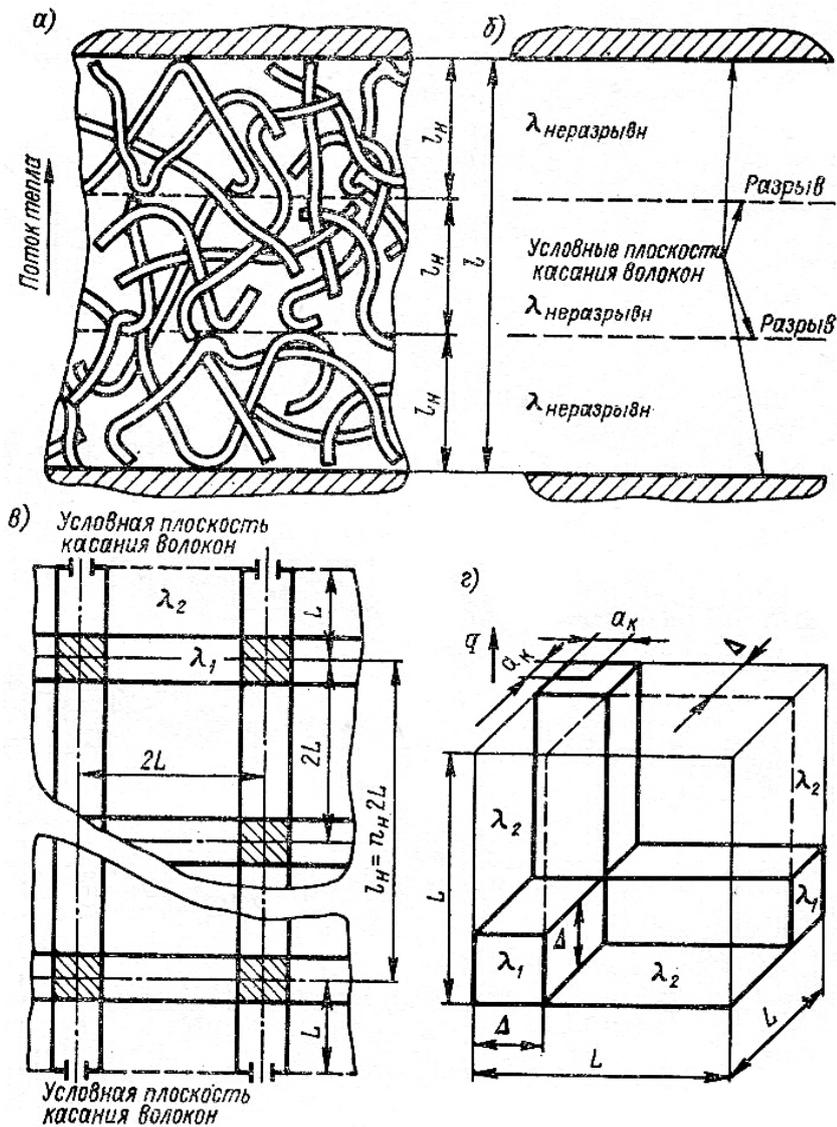


Рис. Модель волокнистого материала [2]:

- а) – схематическое изображение структуры реального материала;
- б) – условные плоскости разрыва волокон, плоскости контакта волокон;
- в) – модель структуры с взаимопроникающими компонентами, отражающая наличие контактных сопротивлений;
- г) – элементарная ячейка модели

В монографии разработана методика расчёта эффективной теплопроводности волокнистых композиционных материалов [2]. Приведём формулу для расчёта эффективной теплопроводности волокнистых материалов и в дальнейшем используем её для теоретических расчётов:

$$\lambda := \frac{\lambda_1}{\frac{0.8}{c^2 + v \cdot (1 - c)^2 + \frac{2 \cdot v \cdot c \cdot (1 - c)}{v \cdot c + 1 - c}} + \frac{0.2}{\frac{c^2 \cdot (y_1)^2}{\Phi} + v \cdot (1 - c)^2 + \frac{2 \cdot v \cdot c \cdot (1 - c)}{v \cdot c + 1 - c}}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  – теплопроводность материала волокна;  $\lambda_2$  – теплопроводность газа (воздух) в порах;  $v = (\lambda_2 / \lambda_1)$ ;  $y_1 = (a_k / \Delta)$  – относительное пятно контакта волокон;  $a_k$  – фактическое пятно контакта (рис. 1, г);  $\Delta$  – размер бруса.

Для минеральных и стеклянных волокон с объёмной плотностью 100–200 кг/м<sup>3</sup> параметр  $y_1$  [2]:

$$y_1 = (2 \div 5) \cdot 10^{-3}.$$

$\Phi(y_1)$  – функция, учитывающая растекание теплового потока.

При малых относительных размерах пятна контакта для определения функции  $\Phi$  используем приближённое выражение [2]:

$$\Phi(y_1) = 0,017 + 0,4y_1. \quad (2)$$

$c = \Delta/L$  – относительный размер элементарной ячейки. Здесь  $L$  – размер элементарной ячейки (рис. 1, г).

Параметр  $c$  рассчитывается по формуле [2]:

$$c = 0.5 + A * \cos \varphi / 3. \quad (3)$$

$$270^\circ \leq \varphi \leq 360^\circ,$$

$$\text{при } 0 \leq m_2 \leq 0,5 \quad A = -1 \quad \varphi = \arccos(1 - 2 \cdot m_2), \quad (4)$$

$$\text{при } 0,5 \leq m_2 \leq 1 \quad A = 1, \quad \varphi = \arccos(2 \cdot m_2 - 1),$$

где  $m_2$  – пористость материала.

Результаты экспериментов показали, что теплопроводность всех исследованных материалов возрастает с ростом температуры.

Если считать, что передача тепла в волокнистых материалах происходит только за счёт теплопроводности (кондукции), то эффективная теплопроводность материала с увеличением пористости должна монотонно стремиться к теплопроводности газа-наполнителя. В действительности было обнаружено, что эффективная теплопроводность волокнистого материала с хаотической структурой с уменьшением плотности вначале уменьшается, а затем начинает увеличиваться [2].

Такое изменение эффективной теплопроводности давало основание предполагать, что большое значение в процессе переноса тепла могут иметь и другие механизмы – излучение и конвекция. Проведённые оценки позволяют утверждать, что во всех изучаемых материалах конвективный перенос тепла между волокнами отсутствует.

Тогда теплопроводность пор определяется суммой молекулярной и лучистой составляющих [2]:

$$\lambda_{\text{ид}} = \lambda_j + \lambda_E . \quad (5)$$

В диапазоне давления газа, заполняющего поры,  $0,01 < P < 20$  МПа величина молекулярной составляющей берётся из справочных данных [3, 4].

Оценку переноса тепла излучением рекомендуется проводить [2, 5] с учётом коэффициента  $k$  ослабления теплового излучения за счёт его поглощения и рассеяния на волокнах:

$$\lambda_E = \frac{16}{3} (n_{\text{ид}}^*)^2 \sigma_{\text{сб}} \cdot \bar{O}^3 \frac{Y(\tau_{\text{ид}})}{k}, \quad (6)$$

где  $n_{\text{ид}}^*$  – эффективный показатель преломления слоя изоляции, частично заполненного волокнами:

$$n_{\text{ид}}^* = 1 + (n_{\text{в}} - 1) * (1 - m_2), \quad (7)$$

где  $n_{\text{в}}$  – показатель преломления вещества волокон;  $\sigma_{\text{сб}}$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $Y(\tau_{\text{ид}})$  – функция Польшца, учитывающая ослабление излучения как в толще слоя, так и путём отражения от ограничивающих слой поверхностей со степенью черноты  $\mathcal{E}$  [2, 3];  $\tau_{\text{ид}} = k \cdot L_{\text{сл}}$  – оптическая толщина слоя;  $L_{\text{сл}}$  – толщина слоя изоляции.

По предложенным формулам была оценена лучистая составляющая теплопроводности и результирующая теплопроводность порового пространства. Результаты расчёта представлены в табл. 1.

Таблица 1

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_{\text{гр}}, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	$\lambda_{\text{ст}}, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$	$\lambda_{\text{пор}}, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$
25	0,025	0,003	0,028
75	0,029	0,005	0,034
100	0,031	0,008	0,039
200	0,038	0,013	0,051
300	0,044	0,025	0,069
400	0,050	0,037	0,087

Из таблицы видно, что при температурах меньше  $200 \text{ } ^\circ\text{C}$  лучистая составляющая теплопроводности гораздо ниже молекулярной, а при  $t = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$  становится соизмеримой с ней.

По формулам (1) – (7) рассчитаны коэффициенты теплопроводности изучаемых материалов.

### Результаты расчётов и сопоставление с экспериментальными данными

Результаты расчётов и сопоставление с экспериментальными данными представлены в табл. 2.

Таблица 2

Образец	t, °C	$\lambda_{\text{эксп}}$ Вт / (м · К)	$\lambda_{\text{расч}}$ Вт / (м · К)	$\delta = \frac{\lambda_{\text{расч}} - \lambda_{\text{эксп}}}{\lambda_{\text{эксп}}} \cdot 100, \%$
ТЗМ-100	25	0,045	0,043	-4
	50	0,047	0,046	-2
	75	0,048	0,049	+2
	90	0,050	0,053	+6
ТЗМ-150	25	0,051	0,049	-4
	50	0,053	0,053	0
	75	0,055	0,057	+4
	90	0,056	0,061	+9
ТИ	25	0,049	0,043	-12
	50	0,051	0,046	-10
	75	0,053	0,050	-6
	90	0,055	0,053	-4

### Литература

1. Теплозащитные конструкции из минеральных волокон // COMPOSITES MARKET. URL: <http://www.b-composites.net/78.html> (дата обращения: 14.11.2013).
2. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
3. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.
4. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., 1972. 650 с.
5. Заричняк Ю.П., Эмиров С.Н., Рамазанова А.Э. Оценка роли теплового излучения при измерении теплопроводности образцов горных пород // Мониторинг. Наука и технологии. 2012. № 3. С. 74–77.