

УДК 62-974

# Исследование конвективного теплообмена структурированного, неоднородного элемента, служащего как теплоизоляционный слой обшивки авиационных изделий

**В.А. Маскайкин, В.П. Махров**

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, 125993, Россия  
e-mail: vladimir.maskaykin@mail.ru*

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-5-230-237

Поступила в редакцию 05.04.2021

После доработки 20.05.2021

Принята к публикации 21.05.2021

Рассматривается одна из актуальных задач – увеличение теплоизоляционных характеристик авиационных изделий, эксплуатируемых в экстремально низких температурах. По результатам теоретического исследования конвективного теплообмена однородного и неоднородного элементов, служащих в качестве теплоизоляционного слоя конструкций авиационных изделий, были получены параметры структурного распределения материалов в зависимости от их распределения по теплоизоляционным характеристикам.

**Ключевые слова:** теплоизоляция, нестационарная теплопроводность, теплоизоляционные материалы, структурирования материалов, конвективный теплообмен.

## Введение

Для обеспечения теплоизоляционных свойств авиационных изделий используется большое разнообразие материалов, например, минеральные, стекловолоконные, полимерные и др., с различной структурой: рыхловолокнистые, стеганые, плетеные, формованные и тканые. При выборе теплоизолирующих конструкций решаются задачи по обеспечению низкой плотности и теплопроводности материалов, по степени их горючести и др. [1]. Исследуются и проводятся разработки по новым материалам и физическим явлениям [2–7]. В ряде литературных источников [8–10] фигурируют разработки и анализ материалов и физических процессов, проводимых в системах, работающих в экстремально низких и высоких температурах.

В данной работе рассматривается теплопроводность материалов в зависимости от их теплоизоляционных характеристик, в частности,

для сплошных материалов, структурированных и многослойных. Определяется актуальность использования исследуемых материалов различной конструктивной комбинации в виде теплоизоляторов авиационных изделий в условиях конвективного теплообмена.

## 1. Метод исследования и принятые допущения

Для решения задачи конвективного теплообмена материалов с различными теплоизоляционными характеристиками были проведены расчеты нестационарной теплопроводности элемента теплоизоляции. Параметры такого элемента с заданными физическими условиями представлены в табл. 1. Размер толщины элемента  $Y$ , основывается на справочных данных теплоизоляции авиационных изделий.

Для исследования теплопроводности через выделенный элемент в условиях конвективного теплообмена приняты допущения:

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Значение
Температура внешней среды $T_c$ , °C	-50
Начальная температур объекта $T_0$ , °C	25
Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·град)	500
Длина объекта $X$ , мм	50
Толщина объекта $Y$ , мм	50
Время исследования $t$ , с	3600

- характеристики теплопроводности материалов являются постоянными в пределах заданных температурных условий;
- материалы, используемые в исследовании, являются изотропными;
- элемент теплоизоляции – выделенный отрезок в виде квадрата из теплоизоляционного слоя обшивки (рис. 1);
- ширина элемента является постоянной;
- параметры конвективного теплообмена определялись из справочных данных летных режимов авиационных изделий (см. табл. 1).

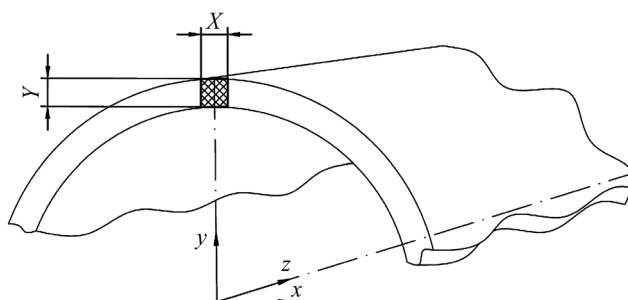


Рис. 1. Схема параметров изолирующего материала

- Исследуемая задача теплопроводности рассматривается в трех частей, в которых теплопроводность элементов определяется в зависимости от теплоизоляционных характеристик материалов [11–15] (табл. 2):
- однородного материала в элементе (рис. 2, а);
  - структурированной комбинации материалов в элементе (рис. 2, б);
  - многослойной комбинации материалов в элементе (рис. 2, в).

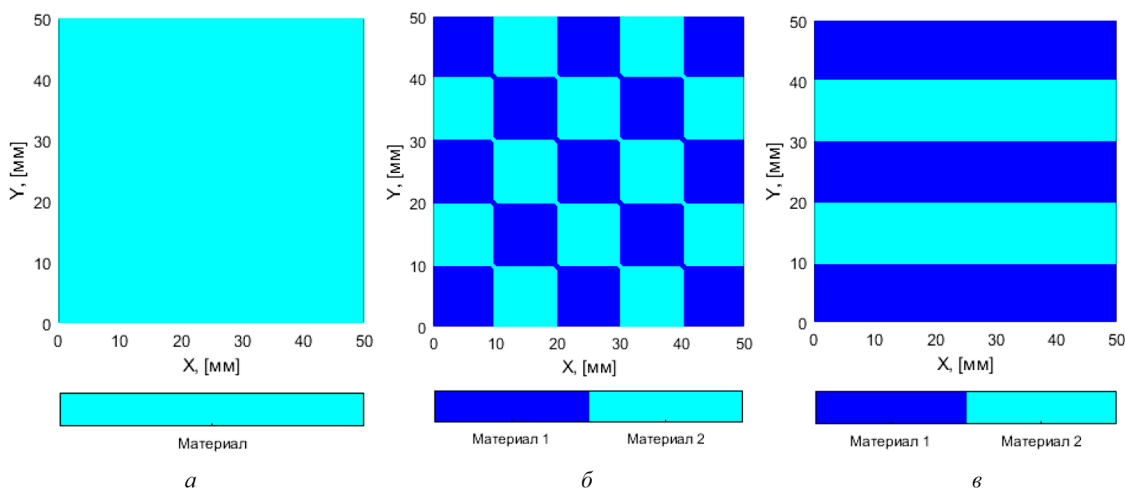


Рис. 2. Постановка задачи: а – для однородного материала в элементе; б – для структурированной комбинации материалов в элементе; в – для многослойной комбинации материалов в элементе

Таблица 2. Теплоизоляционные характеристики материалов

Материал	№	Характеристики		
		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·град)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)
Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем	1	40	840	0.042
	2	70	840	0.039
	3	140	840	0.039
Плиты из стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем	4	15	840	0.047
	5	60	840	0.047
	6	190	840	0.057
Плиты из резольнофенолформальдегидного пенопласта	7	80	1680	0.044
Стеклопластик ВФТ-С	8	1800	962	0.32
Алюминий-магниевый сплав	9	2640	922	122

## 2. Численные исследования рассматриваемой задачи

Общая математическая постановка задачи нестационарной теплопроводности однородного элемента и структурированных неоднородных элементов имеет вид [16]:

$$\rho_n c_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n \left( \frac{\partial^2 T_n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где  $n$  – количество структурных распределений в элементе, зависящее от введенных характеристик материалов;  $t$  – время;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $c$  – удельная теплоемкость материала;  $T_c$  – температура внешней среды.

Для сформулированной задачи (1) начальные условия имеют вид:

$$T(X, Y, 0) = 0.$$

Задаются следующие граничные условия:

– на границе  $y = Y$  при  $0 \leq x \leq X$  выполняется условие конвективного теплообмена с внешней средой

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha (T_{cp} - T);$$

– на границе  $y = 0$  при  $0 \leq x \leq X$  заданы условия теплоизоляции

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

**Таблица 3. Результаты исследования теплообмена в элементе с однородным материалом при временном конвективном воздействии  $t = 3600$  с**

Элемент с однородным материалом									
Материал	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура на границе $y = Y, ^\circ\text{C}$	-48.7	-40.7	-20.3	-50.0	-46.3	-23.0	-20.0	0.0	-50

**Таблица 4. Результаты исследования теплообмена в элементе со структурированной комбинацией материалов и со слоистой комбинацией материалов при временном конвективном воздействии  $t = 3600$  с**

Элемент со структурированной комбинацией материалов		Элемент со слоистой комбинацией материалов	
Материал×Материал	Температура на границе $y = Y, ^\circ\text{C}$	Материал×Материал	Температура на границе $y = Y, ^\circ\text{C}$
1	2	3	4
1×2	-49.0	1×2	-46.3
1×3	-44.0	1×3	-38.6
1×4	-50.0	1×4	-49.7
1×5	-49.6	1×5	-47.8
1×6	-44.0	1×6	-36.4
1×7	-43.5	1×7	-37.4
2×3	-40.7	2×3	-32.0
2×4	-49.7	2×4	-47.4

– на границах между слоями материалов выполняются условия

$$\begin{cases} T_n(t, x, y) = T_{n+1}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial y} = -\lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial y}, \end{cases}$$

$$\begin{cases} T_n(t, x, y) = T_{n+1}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} = -\lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial x}; \end{cases}$$

– на границах  $x = 0, x = X$  задаются условия периодичности искомых функций:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X}.$$

Краевая задача для уравнения (1) решалась конечно-разностным методом [17, 18] на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы. Для численного решения краевой задачи для уравнения (1) применялась локально-одномерная схема Самарского [19]. Дискретизация конвективных слагаемых проводилась на основе монотонной аппроксимации Самарского [19].

### Результаты численного исследования конвективного теплообмена элементов

Результаты исследования характеристик конвективного теплообмена элементов, представлены в табл. 3, 4.

Окончание табл. 4

1	2	3	4
2×5	-48.4	2×5	-43.2
2×6	-41.0	2×6	-30.4
2×7	-40.3	2×7	-31.3
3×4	-46.6	3×4	-36.4
3×5	-43.4	3×5	-31.3
3×6	-34.7	3×6	-20.5
3×7	-33.3	3×7	-20.0
4×5	-50.0	4×5	-49.7
4×6	-46.0	4×6	-41.7
4×7	-45.4	4×7	-42.8
5×6	-43.1	5×6	-35.4
5×7	-42.7	5×7	-35.9
6×7	-34.0	6×7	-21.4
1×8	-31.0	1×8	14.2
2×8	-24.2	2×8	15.7
3×8	-16.0	3×8	16.7
4×8	-39.8	4×8	12.2
5×8	-27.3	5×8	13.0
6×8	-17.1	6×8	11.8
7×8	-16.0	7×8	15.4
8×1	-28.6	8×1	16.0
8×2	-19.0	8×2	17.0
8×3	-8.6	8×3	17.5
8×4	-40.8	8×4	14.5
8×5	-24.0	8×5	14.8
8×6	-11.4	8×6	13.2
8×7	-9.0	8×7	16.3
1×9	-49.8	1×9	17.2
2×9	-49.0	2×9	18.3
3×9	-45.2	3×9	18.9
4×9	-50.0	4×9	15.5
5×9	-49.6	5×9	16.0
6×9	-45.2	6×9	14.5
7×9	-45.2	7×9	17.7
9×1	-49.2	9×1	17.0
9×2	-45.2	9×2	18.0
9×3	-34.4	9×3	18.3
9×4	-50.0	9×4	15.5
9×5	-47.8	9×5	15.5
9×6	-36.7	9×6	13.4
9×7	-33.0	9×7	17.0

Рассмотрим градиент температур по толщине стенки элементов с наилучшими и худшими результатами исследования конвективного теплообмена за указанные промежутки времени. Результаты представлены на рис. 3–8.

### 3. Анализ полученных результатов исследования

В результате численного исследования конвективного теплообмена с выбранными элементами показано, что характерным условием для

увеличения теплоизоляции является взаимозаменяемость процессов теплопроводности материалов между собой. По полученным результатам видно (см. табл. 4), что высокий показатель теплоизоляции имеет элемент со слоистой комбинацией материалов. Характерно, что для удержания положительной температуры элемента в заданное время нужно взаимодействие материалов, имеющих высокие характеристики теплопроводности и плотности, с материалами, имеющими противоположные характеристики.

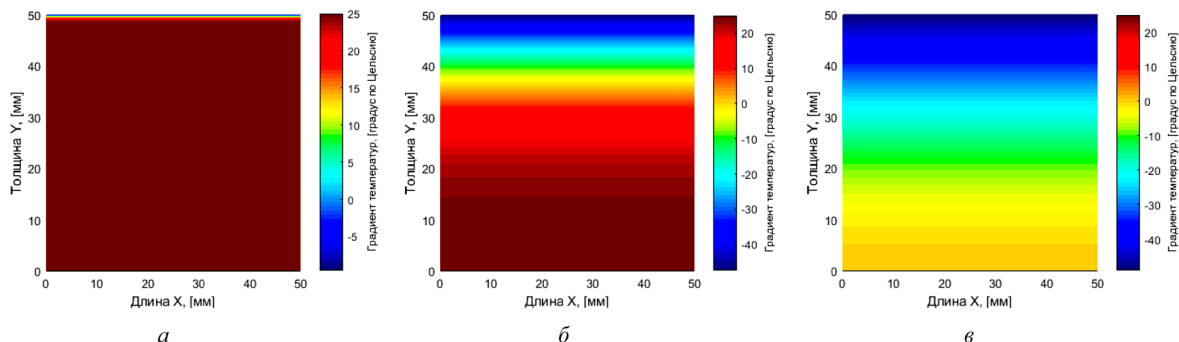


Рис. 3. Градиент температур элемента со сплошным материалом № 8, время конвективного воздействия  $t$ :  $a - 10$  с;  $b - 600$  с;  $v - 3600$  с

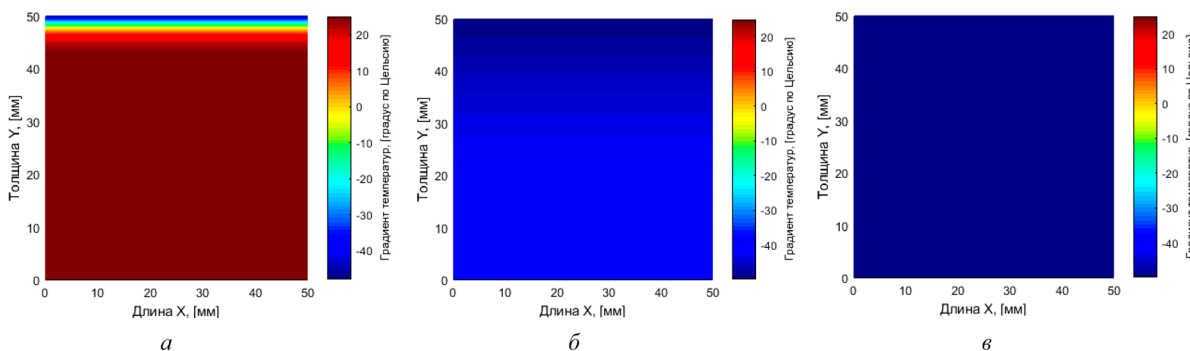


Рис. 4. Градиент температур элемента со сплошным материалом № 4, время конвективного воздействия  $t$ :  $a - 10$  с;  $b - 600$  с;  $v - 3600$  с

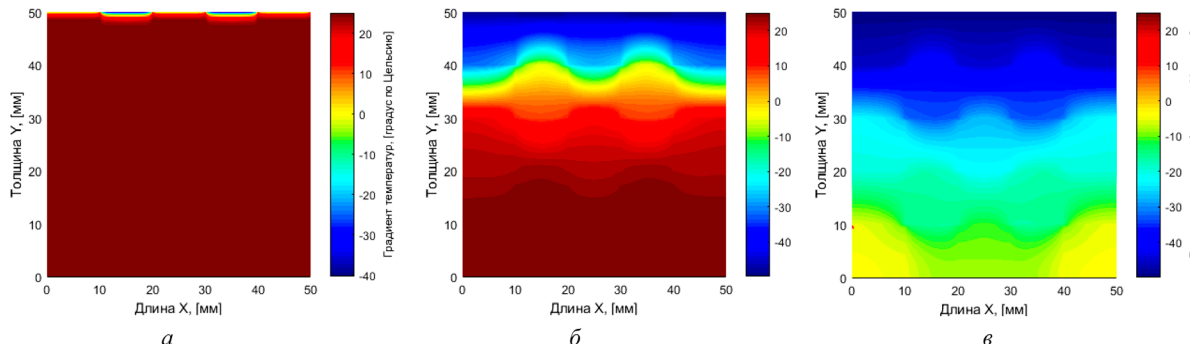


Рис. 5. Градиент температур элемента со структурированной системой материалов № 8×3, время конвективного воздействия  $t$ :  $a - 10$  с;  $b - 600$  с;  $v - 3600$  с

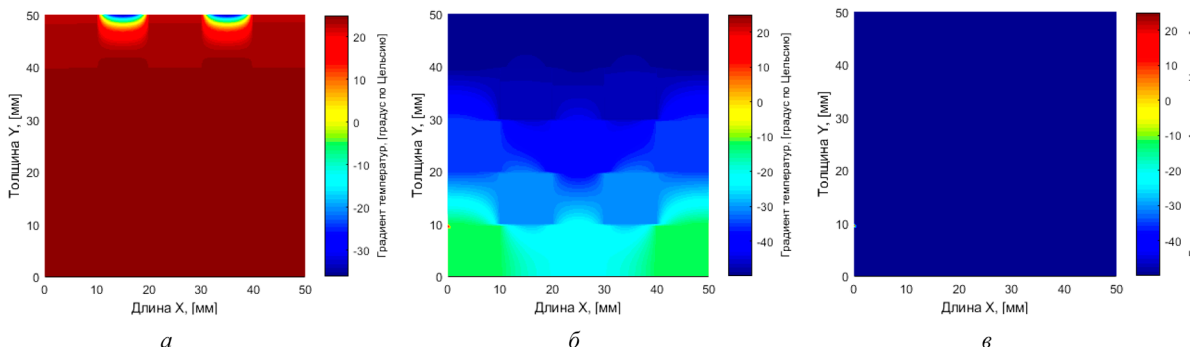


Рис. 6. Градиент температур элемента со структурированной системой материалов № 9×4, время конвективного воздействия  $t$ :  $a - 10$  с;  $b - 600$  с;  $v - 3600$  с

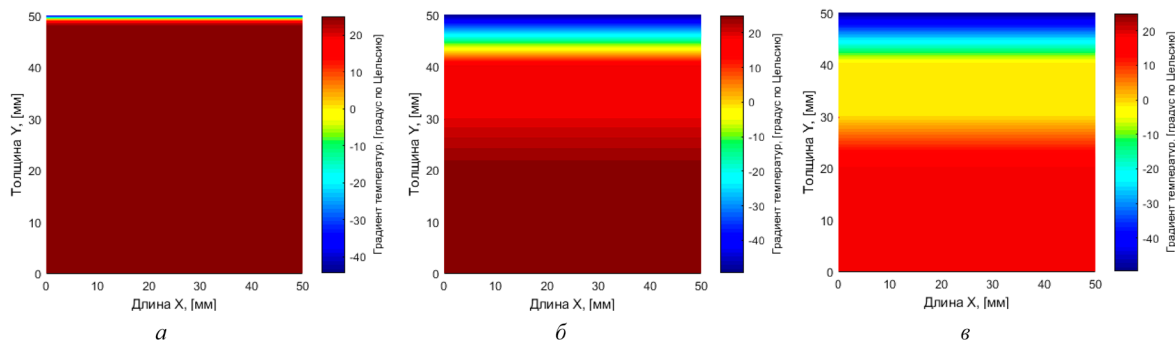


Рис. 7. Градиент температур элемента со слоистой системой материалов № 3×9, время конвективного воздействия  $t$ :  $a$  – 10 с;  $b$  – 600 с;  $v$  – 3600 с

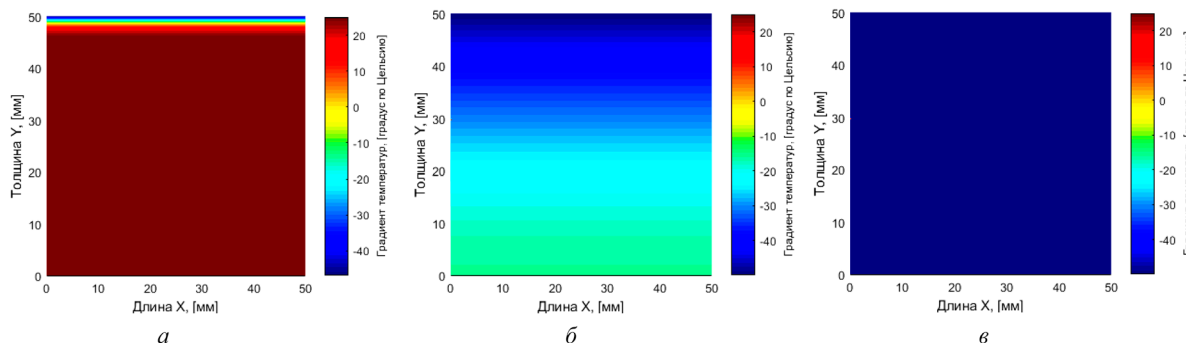


Рис. 8. Градиент температур элемента со слоистой системой материалов № 1×4, время конвективного воздействия  $t$ :  $a$  – 10 с;  $б$  – 600 с;  $в$  – 3600 с

Предположительно, удержание температуры обуславливается тем, что материал 1, имеющий высокие показатели теплоизоляции, не дает остыть следующему слою материала 2 (материал с низкими показателями теплопроводности). В свою очередь, материал 2 переносит тепло материалу 1 вследствие своих высоких характеристик теплопроводности.

В отличие от элемента со слоистой комбинацией материалов, элемент со структурированной комбинацией имеет низкие показатели теплоизоляции (в силу «разрывности» протекания процесса теплообмена). Вследствие чего происходит суммирование процессов теплопередачи материалов в зависимости от их характеристик теплопроводности.

### Вывод

По полученным результатам исследования конвективного теплообмена рассмотренных элементов теплоизоляции можно предположить, что введение элемента со сплошным материалом в качестве теплоизоляционного слоя обшивки авиационных изделий не является приемлемым для многих практических задач

теплоизоляции. Если рассмотреть элементы, в которых в процессе теплообмена участвуют два или более различных материалов, то можно утверждать, что наиболее эффективным элементом для теплоизоляционного слоя конструкции является элемент со слоистой комбинацией материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабашов В.Г., Варрик Н.М.** Теплоизоляционные материалы для современных летательных аппаратов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 3 (21). С. 1–10.
2. **Attalla M.** Experimental investigation of heat transfer and pressure drop of SiO<sub>2</sub>/water nanofluid through conduits with altered cross-sectional shapes // Heat Mass Transfer. 2019. V. 55. P. 3427–3442.
3. **Zhang Y., Zhang X., Li M. et al.** Research on heat transfer enhancement and flow characteristic of heat exchange surface in cosine style runner // Heat Mass Transfer. 2019. V. 55. P. 3117–3131.
4. **Davoodi H., Yaghoubi M.** Experimental and numerical study of natural convection heat transfer from arrays of zig-zag fins // Heat Mass Transfer. 2019. V. 55. P. 1913–1926.
5. **Hooman K., Sadafi H., Mancin S. et al.** Theoretical analysis of free convection in a partially foam-filled enclosure // Heat Mass Transfer. 2019. V. 55. P. 1937–1946.
6. **Woodfield P.L., Masanori Monde, Yuichi Mitsutake.** Time and space resolution of analytical solution for two-

- dimensional inverse heat conduction problem // International Heat Transfer Conference. 2006. V. 13.
7. **Nicola Bianco, Gaetano Contento, Salvatore Cunsolo, Marcello Iasiello, Vincenzo Naso, Maria Oliviero.** Heat transfer enhancement in open-cell foams // Annual review of heat transfer. 2017. V. 20.
  8. **Колычев А.В., Керножицкий В.А., Левихин А.А.** Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов // Вестник МАИ. 2018. Т. 25. № 3. С. 143–150.
  9. **Круглов К.И.** Численный расчет распределения температур в блоке системы питания и управления высокочастотного двигателя // Вестник МАИ. 2017. Т. 24. № 4. С. 63–69.
  10. **Дульнев Г.Н., Новиков В.В.** Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 285 с.
  11. **ГОСТ 9573-2012.** Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 12 с.
  12. **ГОСТ 10499-95.** Изделия теплоизоляционные из стеклянного штапельного волокна. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. 12 с.
  13. **ГОСТ 20916-87.** Плиты теплоизоляционные из пенопласта на основе резольных фенолоформальдегидных смол. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1987. 9 с.
  14. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. 356 с.
  15. **Белецкий В.М., Кривов Г.А.** Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник. К.: КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.
  16. **Киселев Б.А.** Стеклопластики. М.: Государственное научно-техническое изд-во химической литературы, 1961. 240 с.
  17. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.
  18. **Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф.** Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. 144 с.
  19. **Кузнецов Г.В., Шеремет М.А.** Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2007. 172 с.
  20. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. М.: Едиториал УРСС, 2003. 785 с.

## The study of convective heat exchange of structured, inhomogeneous element serving as a heat-insulating layer for the skin of aircraft products

V.A. Maskaykin, V.P. Makhrov

*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia  
e-mail: vladimir.maskaykin@mail.ru*

The presented article considers the heat exchange in various types of combinations of materials to ensure thermal protection. The purpose of such kinds of combinations of materials studying consists in obtaining such type of its structure, which meets the thermal insulation requirements for implementing in the structures operating under extremely low or high temperatures.

As the result of the convective thermal exchange study with the selected elements, it was revealed that interchangeability of the thermal exchange processes of material among themselves is characteristic for thermal insulation enhancing. The results demonstrate the element with layered combination of materials has high thermal insulation index. Interaction of materials with the opposite thermal conductivity characteristics, peculiar to the elements under consideration with layered combination of materials, is necessary to keep a positive temperature of the element. Presumably, the retention of temperature is stipulated by the fact that a material with high thermal insulation indices does not allow the next layer of material cooling (the material with low thermal conductivity). A material with low thermal conductivity indices in its turn transfers heat to a material with high thermal insulation indices due to its high thermal conductivity characteristics.

Unlike an element with a layered combination of materials, an element with a structured combination of materials has low thermal insulation indices due to the «discontinuity» of the heat exchange process. As the result, a summation of the processes of materials heat transfer occurs, depending on their thermal conductivity characteristics.

According to the obtained results of the study on convective heat transfer of the considered thermal insulation elements, it can be assumed that the introduction of an element with a solid material as a heat-insulating layer for the skin of aircraft products is unacceptable. When considering elements, which involve two or more different materials in the heat exchange process, the most effective element for the insulating skin layer is the element with a layered combination of materials.

**Keywords:** thermal insulation, non-stationary thermal conductivity, thermal insulation materials, structuring of materials, convective heat transfer.

## REFERENCES

1. **Babashov V.G., Varrik N.M.** Novosti materialovedeniya. *Nauka i tekhnika*, 2016, no. 3, pp. 1–10.
2. **Attalla M.** Experimental investigation of heat transfer and pressure drop of SiO<sub>2</sub>/water nanofluid through conduits with altered cross-sectional shapes. *Heat Mass Transfer*, 2019, vol. 55, pp. 3427–3442.
3. **Zhang Y., Zhang X., Li M. et al.** Research on heat transfer enhancement and flow characteristic of heat exchange surface in cosine style runner. *Heat Mass Transfer*, 2019, vol. 55, pp. 3117–3131.
4. **Davoodi H., Yaghoubi M.** Experimental and numerical study of natural convection heat transfer from arrays of zigzag fins. *Heat Mass Transfer*, 2019, vol. 55, pp. 1913–1926.
5. **Hooman K., Sadafi H., Mancin S. et al.** Theoretical analysis of free convection in a partially foam-filled enclosure. *Heat Mass Transfer*, 2019, vol. 55, pp. 1937–1946.
6. **Woodfield P.L., Masanori Monde, Yuichi Mitsutake.** Time and space resolution of analytical solution for two-dimensional inverse heat conduction problem. *International Heat Transfer Conference*, 2006, vol. 13.
7. **Nicola Bianco, Gaetano Contento, Salvatore Cunsolo, Marcello Iasiello, Vincenzo Naso, Maria Oliviero.** Heat transfer enhancement in open-cell foams. *Annual review of heat transfer*, 2017, vol. 20.
8. **Kolychev A.V., Kernozhitskiy V.A., Levikhin A.A.** *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 143–150.
9. **Kruglov K.I.** *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 63–69.
10. **Dul'nev G.N., Novikov V.V.** *Protsessy perenosa v neodnorodnykh sredakh* (Transport processes in heterogeneous environments), Leningrad: Energoatomizdat, 1991. 285 p.
11. **GOST 9573-2012.** *Plyty iz mineral'noy vaty na sinteticheskom svyazuyushem teploizolyatsionnyye. Tekhnicheskiye usloviya.* [Thermal insulating plates of mineral wool on synthetic binder. Specifications, State standard 9573-2012]. Moscow: Standartinform, 2019. 12 p.
12. **GOST 10499-95.** *Isdeliya teploizolyatsionnyye iz steklyanogo shtapel'nogo volokna. Tekhnicheskiye usloviya.* [Heat insulating products made of glass staple fibre. Specifications, State standard 10499-95]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1996. 12 p.
13. **GOST 20196-87.** *Plyty teploizolyatsionnyye iz penoplasta na osnove rezol'nykh fenoloformal'degidnykh smol. Tekhnicheskiye usloviya.* [Foam plastic heat-insulating slabs based on resol phenol-formaldehyde resins. Specifications, State standard 20196-87]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1987. 9 p.
14. **Chirkin V.S.** *Teplofizicheskie svoystva materialov. Spravochnik.* [Thermophysical properties of materials. Guide]. Moscow: FIZMATGIZ, 1959. 356 p.
15. **Beleckij V.M., Krivov G.A.** *Aljuminievye splavy (sostav, svoystva, tehnologiya, primenenie). Spravochnik.* [Aluminum alloys (composition, properties, technology, application)]. Krasnoyarsk: KOMINTEH, 2005. 365 p.
16. **Kiselev B.A.** *Stekloplastiki.* [Fiberglass plastic]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo himicheskoy literatury, 1961. 240 p.
17. **Lykov A.V.** *Teorija teploprovodnosti.* [Theory of thermal conductivity]. Moscow: Vyssh. Shk., 1967. 600 p.
18. **Berkovskij B.M., Nogotov E.F.** *Raznostnye metody issledovaniya zadach teploobmena.* [Difference methods for studying heat transfer problems]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1976. 144 p.
19. **Kuznecov G.V., Sheremet M.A.** *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti: uchebnoe posobie.* [Difference methods for solving heat conduction problems: tutorial]. Tomsk: TPU, 2007. 172 p.
20. **Samarskiy A.A., Vabishhevich P.N.** *Vychislitel'naya teploperedacha.* [Computational heat transfer]. Moscow: Editorial URSS, 2003. 785 p.