

Численный метод исследования температурных режимов неоднородного, структурированного тела

Маскайкин В.А.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: vladimir.maskaykin@mail.ru*

Статья поступила 08.11.2020

Аннотация

В данной статье рассматривается одна из актуальных задач – зависимость характеристик теплопроводности различных материалов относительно их структурного распределения в элементе (теле), служащем как теплоизолятор. Исследование нестационарных температурных режимов неоднородного, структурированного тела проводилось численным методом в двумерном виде, на основе неявной разностной схемы. В качестве материалов, были взяты материалы, широко применяемые в авиационной промышленности. Теоретические исследования показывают, что структурное распределение материалов в неоднородном теле в зависимости от их характеристик существенно влияют на теплоизоляцию конструкций в отличие от однородного тела. Результаты работы могут быть использованы для теплоизоляции слоев обшивки корпусов и других конструкций летательных аппаратов, работающих в температурных режимах.

Ключевые слова: теплоизоляция, неоднородное тело, нестационарная теплопроводность, теплоизоляционные материалы, структурирование материалов в теле.

Введение

В авиационной промышленности для работ в условиях экстремально низких температур используются теплоизоляционные минеральные, стекловолоконистые, полимерные материалы. В некоторых случаях для получения теплоизоляции создают конструкции, которые выполняют функцию абсолютной изоляции газов от внешних тепловых воздействий. Если рассматривать теплоизоляционные материалы, то ресурс термоизоляции таких материалов не всегда может удовлетворить потребности удержания температуры и является второстепенным предметом, работающим в температурных режимах.

Вопросам теплопередачи посвящаются многие работы отечественных и зарубежных авторов [1-11]. Актуальность рассматриваемой задачи заключается в исследовании температурных режимов неоднородного, структурированного тела, в следствии чего, получение нового вида теплоизоляции с ее увеличенными характеристиками. Такой вид теплоизоляции может применяться для теплоизоляции слоев обшивки корпусов и других конструкций летательных аппаратов, работающих в температурных режимах.

Для решения поставленной задачи рассмотрим условный, выделенный отрезок (элемент) теплоизоляционной обшивки. С помощью различных материалов и их

структурного распределения в элементе требуется обеспечить термоизоляцию данного элемента в условиях низких температур.

Общая математическая постановка задачи теплопроводности для расчетов структурного распределения материалов в элементе имеет вид:

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

Начальные и граничные условия имеют вид:

$$t=0: T = T_0, 0 \leq x \leq L, 0 \leq y \leq H; \quad (2)$$

$$x=0: \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0; \quad (3)$$

$$x=L: T = T_c, t > 0; \quad (4)$$

$$y=0: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0; \quad (5)$$

$$y=H: \frac{\partial T}{\partial y} = 0, t > 0; \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_n(t, x, y) = T_{n+1}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x} = -\lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial x}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} T_n(t, x, y) = T_{n+1}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial y} = -\lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial y}. \end{cases} \quad (8)$$

где n – количество структурных распределений в элементе, зависящее от введенных характеристик материалов, t – время, λ – коэффициент теплопроводности материала, c – удельная теплоемкость материала, T_c – температура внешней среды, T_0 – начальная температура выделенного отрезка (тела), L – длина тела, H – ширина тела.

Решение данной задачи проводится численно на основе неявной разностной схемы [12]. Дискретизация уравнений (1) проводится на основе одномерной схемы А.А. Самарского [13,14]. Следует отметить, что на границах $x = L$ рассматриваются граничные условия первого рода, где постоянная температура внешней среды T_c [15]. Объем твердого тела, выделяемый тепло, существенно мал по отношению к объёму окружающей среды, имеющей отрицательную температуру. Твердое тело внутренних источников тепла не имеет. Поэтому применение на границе $x = L$ граничного условия III рода является неуместным в данной задаче [15].

Исходные данные представлены в таблицах 1, 2 [16-21].

Таблица 1.

Параметры	Значение
Температура внешней среды T_c , °С	-50
Начальная температур объекта T_0 , °С	25
Длинна объекта L , мм	50
Ширина объекта H , мм	50
Время исследования t , с	3600

Таблица 2.

Материал	№	Характеристики		
		Плотность, кг/м ³	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)
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

Выбор теплоизоляционного материала основывается на степени его горючести.

Данные материалы входят в категорию: негорючие и трудно горючие.

Рассмотрим двумерную задачу теплопроводности однородного тела (рис.1).

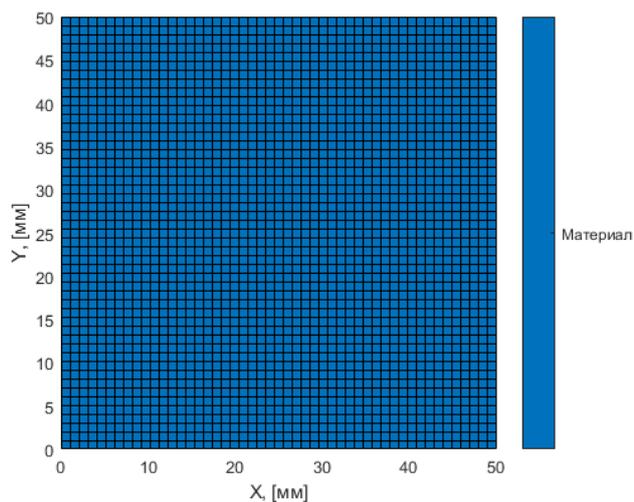


Рис. 1. Задача теплопроводности однородного тела

Результат расчета теплопроводности однородного тела с материалом – плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем представлен в графическом виде на рис. 2.

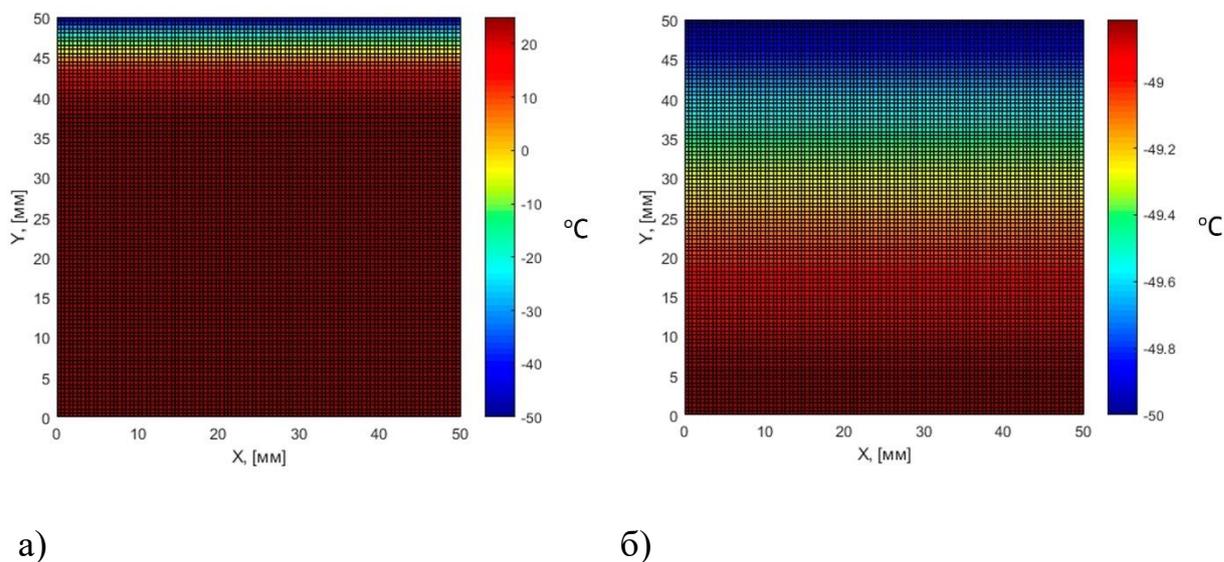


Рис. 2. Результат расчета теплопроводности однородного тела с материалом № 1 со временем температурного воздействия t : а) 10 с; б) 3600 с.

Результаты расчетов теплопроводности тела с материалами № 1-9, приведены на рис 3.

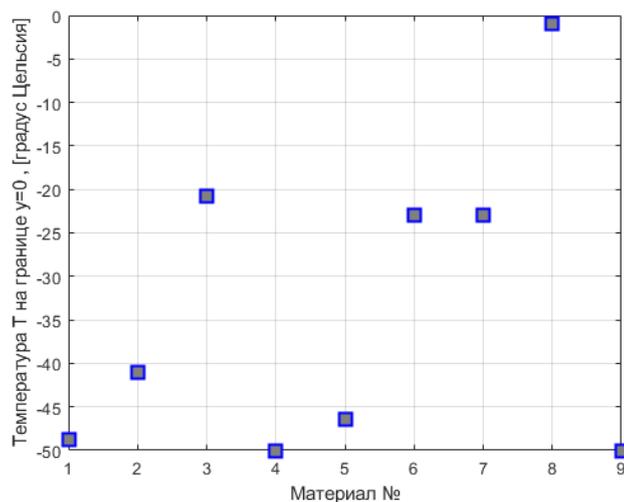


Рис. 3. Результаты расчетов теплопроводности тела с материалами № 1-9

Рассмотрим двумерную задачу теплопроводности неоднородного тела, имеющего структуру слоения материалов (рис.4).

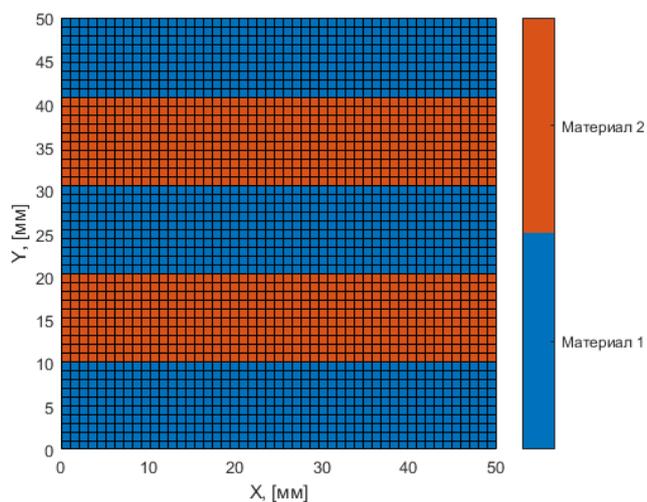


Рис. 4. Задача теплопроводности неоднородного тела

Результат расчета теплопроводности неоднородного тела с материалами № 1 и № 9 представлен в графическом виде на рис. 5.

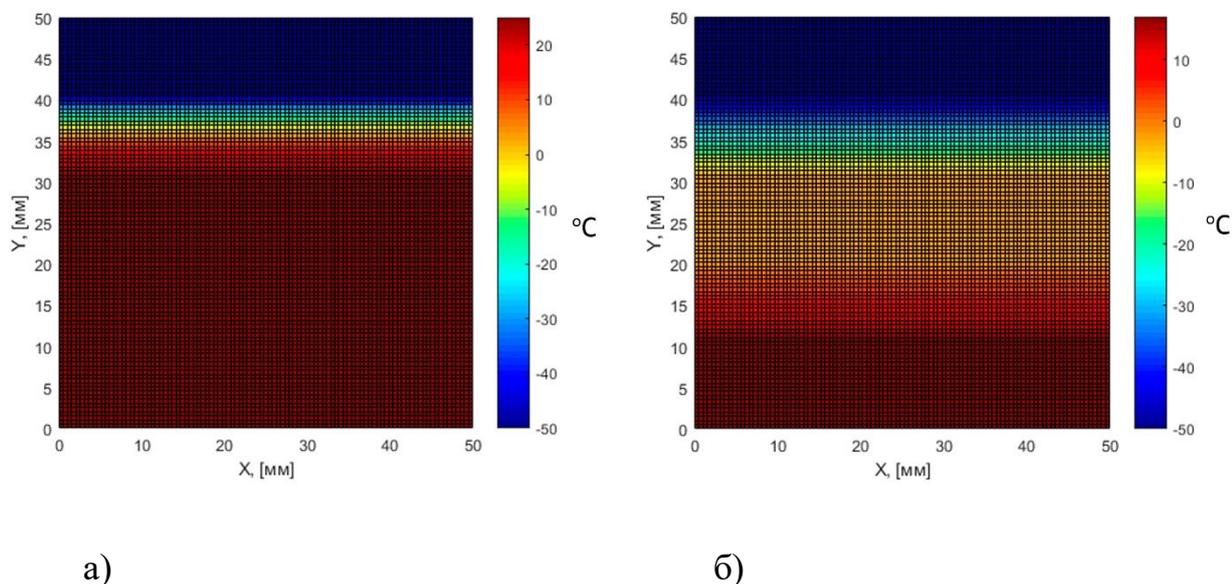


Рис. 5. Результат расчета теплопроводности неоднородного тела с материалами № 1 и № 9 со временем температурного воздействия t : а) 10 с; б) 3600 с.

Результаты расчетов теплопроводности тела в комбинации материалов № 1-9, приведены на рис. 6.

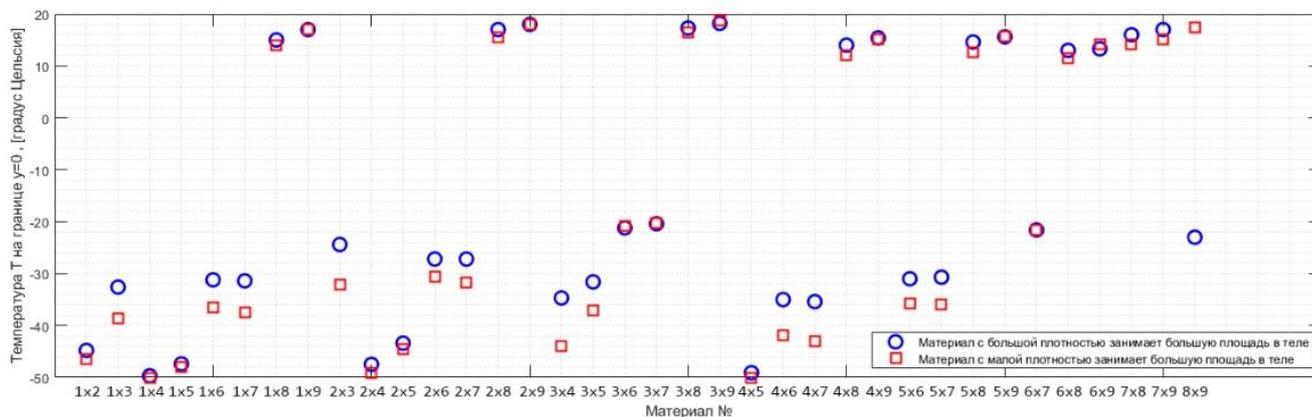


Рис. 6. Результаты расчетов теплопроводности тела в комбинации материалов № 1-9

Рассмотрим двумерную задачу теплопроводности неоднородного тела, имеющего структуру шахматного распределения материалов (рис.7).

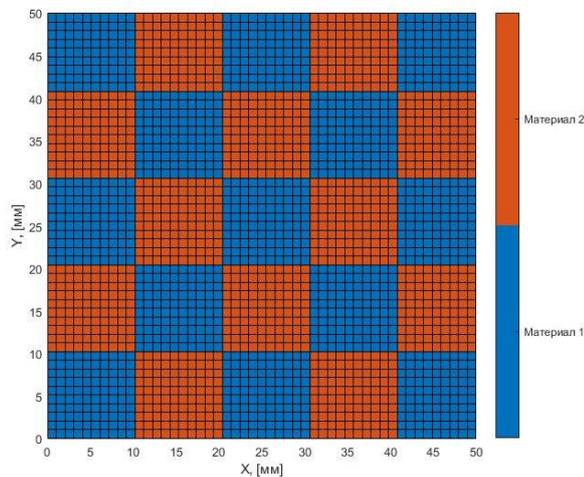


Рис. 7. Задача теплопроводности неоднородного тела

Результат расчета теплопроводности неоднородного тела с материалами № 1 и 9 представлен в графическом виде на рис. 8.

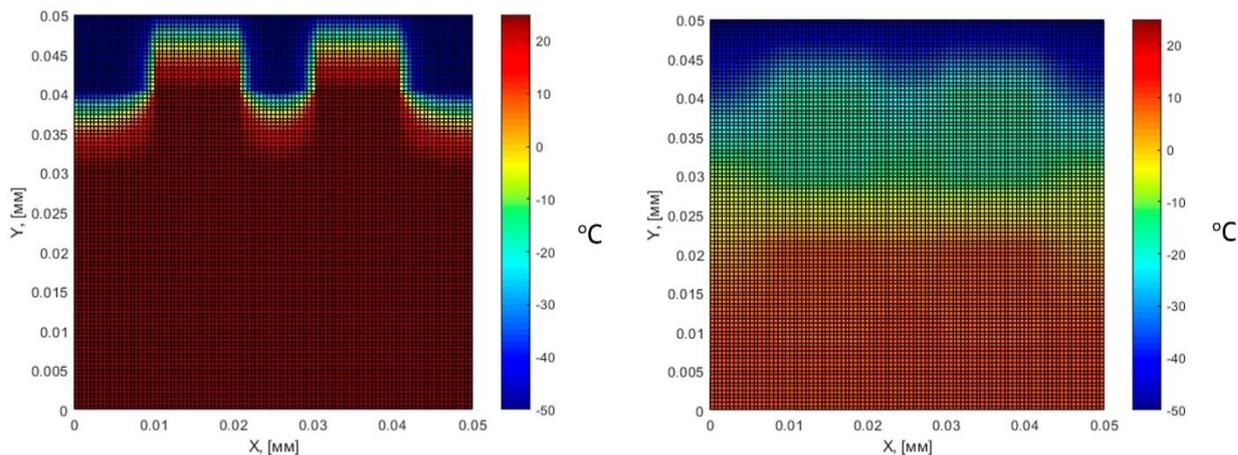


Рис. 8. Результат расчета теплопроводности неоднородного тела с материалами № 1 и 9 со временем температурного воздействия t : а) 10 с; б) 3600 с.

Результаты расчетов теплопроводности тела в комбинации материалов № 1-9, приведены на рис. 9.

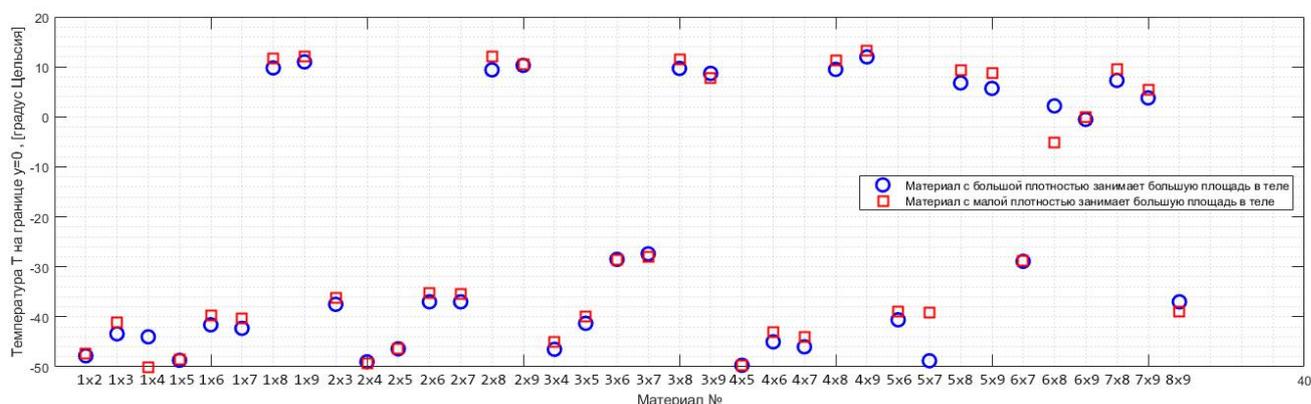


Рис. 9. Результаты расчетов теплопроводности тела в комбинации материалов № 1-9

Выводы

Приведенные исследования теплопроводности структурированного неоднородного тела показывают, что взаимодействие различных материалов в элементе и структурное распределение материалов в элементе играет большую роль в увеличении теплоизоляционных свойств.

В неоднородных телах взаимодействие различных теплоизоляционных материалов между собой имеет низкий показатель теплоизоляции в отличие от взаимодействия теплоизоляционного материала с другим, имеющим противоположные характеристики теплопроводности. Увеличение теплоизоляции в таком теле сопровождается температурной изоляцией материала, имеющего высокие

свойства теплопроводности. Происходит взаимозамещение, «уравновешивание» процессов теплопроводности материалов между собой.

Если рассматривать структурное распределение материалов в теле и их взаимодействие, то по полученным результатам видно, что любая структура распределения материалов в теле имеет разные свойства теплопроводимого взаимодействия. В задаче теплопроводности неоднородного тела, имеющую теплопроводимую структуру слоения материалов, для увеличения теплоизоляции характерно взаимодействия материалов, имеющих большую плотность. При этом, в процессе решения задачи, показано, что материал с высокими показателями теплопроводности имеет большую площадь, чем материал с меньшим показателем теплопроводности. В задаче теплопроводности неоднородного тела, имеющего структуру шахматного распределения материалов, для увеличения теплоизоляции характерно взаимодействия материалов, имеющих противоположные значения свойств теплопроводности. Чем больше разность в свойствах материалов, тем выше показатели теплоизоляции тела. При чем в процессе решения задачи, показано, что материал с высокими показателями теплопроводности имеет меньшую площадь, чем материал с большим показателем теплопроводности.

Библиографический список

1. Attalla M. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop of SiO₂/water nanofluid through conduits with altered cross-sectional shapes Heat // Heat and Mass Transfer, 2019, no. 55, pp. 3427 – 3442. DOI: [10.1007/s00231-019-02668-0](https://doi.org/10.1007/s00231-019-02668-0)

2. 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 and Mass Transfer, 2019, no. 55, pp. 3117 - 3131. DOI: [10.1007/s00231-019-02647-5](https://doi.org/10.1007/s00231-019-02647-5)
3. Davoodi H., Yaghoubi M. Experimental and numerical study of natural convection heat transfer from arrays of zigzag fins // Heat and Mass Transfer, 2019, no. 55, pp. 1913 - 1926. DOI: [10.1007/s00231-018-2449-5](https://doi.org/10.1007/s00231-018-2449-5)
4. Hooman K., Sadafi H., Mancin S. et al. Theoretical analysis of free convection in a partially foam-filled enclosure // Heat and Mass Transfer, 2019, no. 55, pp. 1937 – 1946. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2466-4>
5. 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. DOI: [10.1615/IHTC13.p27.50](https://doi.org/10.1615/IHTC13.p27.50)
6. 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, pp. 317 - 366. DOI: [10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2017017615](https://doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2017017615)
7. Маскайкин В.А. Теоретическое исследование температурных режимов при обтекании осесимметричных тел, транспортируемые на внешней подвеске летательных аппаратов // Труды МАИ. 2020. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115116&eng=N>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-4](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-4)
8. Бендерский Б.Я., Чернова А.А. Теплообмен в камере сгорания ракетного двигателя при изменении геометрии канально-щелевого заряда твердого топлива // Труды МАИ.

2018. № 111. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=115121>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-5)

9. Савицкий Д.В., Аксёнов А.А., Жлуктов С.В. Численное моделирование взаимодействия аргоновой плазмы с углеродным образцом теплозащитного покрытия

// Труды МАИ. 2020. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96554>

10. Егоров И.А. Определение температурного поля многослойной обшивки летательного аппарата с учетом зависимости теплофизических характеристик от температуры

// Труды МАИ. 2016. № 86. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=67804>

11. Горячев О.В., Минчук С.В. Математическая модель тепловых процессов в моментных двигателях

// Труды МАИ. 2012. № 62. URL:

<http://trudymai.ru/published.php?ID=35541>

12. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. – Минск: Наука и техника, 1976. - 144 с.

13. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 785 с.

14. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. – Томск: ТПУ, 2007. – 172 с.

15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.

16. Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные. Технические условия. ГОСТ 9573-2012. – М.: Стандартиформ, 2019. – 12 с.

17. Изделия теплоизоляционные из стеклянного штапельного волокна. Технические условия. ГОСТ 10499-95. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 12 с.
18. Плиты теплоизоляционные из пенопласта на основе резольных фенолоформальдегидных смол. Технические условия. ГОСТ 20916-87. – М.: Издательство стандартов. 1987. – 9 с.
19. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. - М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. - 356 с.
20. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справочник. - Киев: КОМИНТЕХ, 2005. – 365 с.
21. Киселев Б.А. Стеклопластики. - М.: Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1961. – 240 с.

Numerical method for studying temperature regimes of an inhomogeneous, structured body

Maskaykin V.A.

*Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia
e-mail: vladimir.maskaykin@mail.ru*

Abstract

In the aviation industry, thermal insulation mineral, fiberglass and polymer materials are employed for operation in extremely low temperature conditions. In certain cases, the structures, which perform the function of absolute isolation of gases from the external thermal impacts, are being created to obtain thermal isolation. If thermal isolation materials are being considered, the thermal isolation life span of such materials does not always satisfy the needs for temperature retention, and being regarded as a secondary subject operating in temperature regimes. The presented work solves two dimensional thermal conductivity problem of the element serving as a thermal insulator. It includes as well the study of heat transfer at the interaction of various materials between each other and their structural distribution in the element.

To solve the set problem, let us consider a conventionally selected segment (element) of the heat-insulating sheathing. The requirement consists in ensuring thermal isolation of the specified element in conditions of low temperatures by means of various materials and their structural distribution in the element. This problem solution is being performed by creating mathematical model and solving it numerically based on an implicit difference scheme. Computations of the mathematical model include the thermal conductivity

problems of homogeneous body, a heterogeneous body with the structure of materials stratification, and the structure of the chess distribution of materials.

The results of the study show that the interaction of different materials in the element and the structural distribution of materials in the element play an important role in increasing thermal insulation properties. Interaction in heterogeneous bodies of various heat-insulating materials with each other has a low thermal insulation index, in contrast to the interaction of a heat-insulating material with the other, having the opposite thermal conductivity characteristics. An increase in thermal insulation in such body is accompanied by thermal insulation of a material with high thermal conductivity properties. A mutual substitution, “balancing” of the processes of thermal conductivity of materials with each other occurs.

Keywords: thermal insulation, heterogeneous body, non-stationary thermal conductivity, thermal insulation materials, materials structuring in the body.

References

1. Attalla M. Experimental investigation of heat transfer and pressure drop of SiO₂/water nanofluid through conduits with altered cross-sectional shapes *Heat, Heat and Mass Transfer*, 2019, no. 55, pp. 3427 – 3442. DOI: [10.1007/s00231-019-02668-0](https://doi.org/10.1007/s00231-019-02668-0)
2. 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 and Mass Transfer*, 2019, no. 55, pp. 3117 - 3131. DOI: [10.1007/s00231-019-02647-5](https://doi.org/10.1007/s00231-019-02647-5)

3. Davoodi H., Yaghoubi M. Experimental and numerical study of natural convection heat transfer from arrays of zigzag fins, *Heat and Mass Transfer*, 2019, no. 55, pp. 1913 - 1926. DOI: [10.1007/s00231-018-2449-5](https://doi.org/10.1007/s00231-018-2449-5)
4. Hooman K., Sadafi H., Mancin S. et al. Theoretical analysis of free convection in a partially foam-filled enclosure, *Heat and Mass Transfer*, 2019, no. 55, pp. 1937 – 1946. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-018-2466-4>
5. 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. DOI: [10.1615/IHTC13.p27.50](https://doi.org/10.1615/IHTC13.p27.50)
6. 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, pp. 317 - 366. DOI: [10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2017017615](https://doi.org/10.1615/AnnualRevHeatTransfer.2017017615)
7. Maskaikin V.A. *Trudy MAI*, 2020, no. 111, URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115116&eng=N>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-4](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-4)
8. Benderskii B.Ya., Chernova A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 111. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=115121>. DOI: [10.34759/trd-2020-111-5](https://doi.org/10.34759/trd-2020-111-5)
9. Savitskii D.V., Aksenov A.A., Zhluktoy S.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 101. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96554>
10. Egorov I.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 86. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67804>
11. Goryachev O.V., Minchuk S.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 62. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35541>

12. Berkovskii B.M., Nogotov E.F. *Raznostnye metody issledovaniya zadach teploobmena* (Difference methods for studying heat transfer problems), Minsk, Nauka i tekhnika, 1976, 144 p.
13. Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* (Computational heat transfer), Moscow, Editorial URSS, 2003, 785 p.
14. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* (Difference methods for solving heat conduction problems), Tomsk, TPU, 2007, 172 p.
15. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* (Theory of thermal conductivity), Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 600 p.
16. *Plity iz mineral'noi vaty na sinteticheskom svyazuyushchem teploizolyatsionnye. Tekhnicheskie usloviya. GOST 9573-2012* (Thermal insulating plates of mineral wool on syntetic binder. Specifications, State Standard 9573-2012), Moscow, Standartinform, 2019, 12 p.
17. *Izdeliya teploizolyatsionnye iz steklyannogo shtapel'nogo volokna. Tekhnicheskie usloviya. GOST 10499-95* (Heat insulating products made of glass staple fibre. Specifications, State standard 10499-95), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1996, 12 p.
18. *Plity teploizolyatsionnye iz penoplasta na osnove rezol'nykh fenoloformal'degidnykh smol. Tekhnicheskie usloviya. GOST 20916-87* (Foam plastic heat-insulating slabs based on resol phenol-formaldehyde resins. Specifications, State standard 20916-87), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1987, 9 p.
19. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoistva materialov* (Thermophysical properties of materials), Moscow, FIZMATGIZ, 1959, 356 p.

20. Beletskii V.M., Krivov G.A. *Alyuminievye splavy (sostav, svoistva, tekhnologiya, primeneniye)* (Aluminum alloys (composition, properties, technology, application), Kiev, KOMINTEKk, 2005, 365 p.

21. Kiselev B.A. *Stekloplastiki* (Fiberglass plastic), Moscow, Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo khimicheskoi literatury, 1961, 240 p.