

Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 2. С. 79–87  
Thermal processes in engineering, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 79–87

Научная статья  
УДК 62-977  
DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-79-87

## Проектное формирование теплоизоляции для термостатирования элементов конструкций беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в температурных условиях Арктики

В.А. Маскайкин<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Москва, Россия  
vladimir.maskaykin@mail.ru✉

**Аннотация.** Статья посвящена повышению термоизоляционных свойств беспилотных летательных аппаратов, эксплуатируемых в экстремальных температурах. Проводятся теоретические исследования формирования теплоизоляционной конструкции малой толщины, обеспечивающей высокие показатели теплоизоляции, методом проектирования. Путем проведения теоретического исследования теплообмена различных многослойных схем теплоизоляционной конструкции с вариацией различных характеристик ее материалов, определяется оптимальная схема теплоизоляционной конструкции и входящие в нее характеристики материалов. Проводится сравнительный анализ аналогов, используемых в качестве теплоизоляции летательного аппарата, с теплоизоляционной конструкцией, рассматриваемой в работе. Теоретическое исследование теплообмена различных теплоизоляционных конструкций проводится численным конечно-разностным методом. По результатам теоретического исследования была разработана оптимальная теплоизоляционная конструкция, обеспечивающая высокие показатели теплоизоляции при малой толщине. Выявлены преимущества и недостатки теплоизоляционной конструкции, рассматриваемой в работе с аналогами теплоизоляционных конструкций, используемых в летательных аппаратах.

**Ключевые слова:** термостатирование беспилотных летательных аппаратов, температурные условия Арктики, теплоизоляционные материалы, многослойная теплоизоляционная конструкция, двунаправленная прямоугольная схема армирования, нестационарная теплопроводность

**Для цитирования.** Маскайкин В.А. Проектное формирование теплоизоляции для термостатирования элементов конструкций беспилотных летательных аппаратов, функционирующих в температурных условиях Арктики // Тепловые процессы в технике. 2023. Т. 15. № 2. С. 79-87. DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-79-87

Original article

## Thermal insulation design forming for thermostating of the unmanned aerial vehicles functioning under arctic temperature conditions

V.A. Maskaykin<sup>1✉</sup>

<sup>1</sup> Design Engineer of “State Research and Production Enterprise “Region”, Moscow, Russia  
vladimir.maskaykin@mail.ru✉

© Маскайкин В.А., 2023

**Abstract.** The article is devoted to the up-to-date task of increasing thermal insulation properties of the unmanned aerial vehicles being operated at the extreme temperatures. Theoretical studies on forming a low thickness heat-insulating structure, ensuring high heat-insulation indices, are being conducted by the design method. Optimal heat-insulation scheme and characteristics of materials including in it are being determined by conducting theoretical study on the heat transfer of various multi-layer heat-insulating structures with of various characteristics variation of its materials. Comparative analysis of analogues, employed as heat isolation materials of the aircraft with the heat-insulating structure considered in this work, is being performed. Theoretical study of the heat exchange of various heat-insulating structures is being conducted by numerical finite-difference method. Optimal heat-insulating structure ensuring high indicators of heat insulation at small thickness was developed by the results of theoretical study. The pros and contras of the heat-insulating structure being considered on this work compared to their counterparts employed in the aircraft were revealed.

**Keywords:** thermostating of unmanned aerial vehicles, Arctic temperature conditions, thermal insulation materials, multilayer thermal insulation structure, bidirectional rectangular reinforcement scheme, non-stationary thermal conductivity

**For citation:** Maskaykin V.A. Thermal insulation design forming for thermostating of the unmanned aerial vehicles functioning under arctic temperature conditions. *Thermal processes in engineering*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 79–87. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2023-15-2-79-87

### Введение

Анализ литературных источников, в которых рассматривается проблема сохранения эффективности функционирования беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в сложных метеорологических условиях, показал, что обеспечение температурных режимов работы бортовых систем, двигательных установок в экстремальных температурных условиях является важной и актуальной задачей [1–4]. Для обеспечения температурного режима БПЛА, работающего в непростых погодных условиях, сегодня используют системы термосваривания с применением различных теплоизоляционных конструкций и материалов. Например, широкое распространение в авиастроении получили минеральные волокнистые материалы, такие как стекловолна, базальтовые, кварцевые и муллитокремнеземные волокна, волокна на основе оксида алюминия [5–8]. Под теплоизоляционной конструкцией понимается конструкция со структурным распределением в ней различных материалов. Как правило, такие конструкции состоят из основного материала – теплоизоляционного или теплозвукоизолирующего наружного защитного покрытия – и крепления. Теплоизоляционные конструкции имеют разнообразные исполнения и решения. В частности, теплоизоляцию выполняют из одного или нескольких слоев отдельных пластин, панелей, которые крепят к шпангоутам и стрингером различными креплениями в виде козырьков, застежек и шнуров [9–14].

Существуют также конструктивные решения применения теплоизоляции в летательных аппаратах, в которых теплоизоляцию устанавливают на несущую конструкцию внутреннего каркаса, стрингеры и рамы расположены на наружной стороне конструкции [15].

В настоящей работе проводятся исследования по проектированию теплоизоляционной конструкции с высокими показателями теплоизоляции и малой толщины, отвечающей требованиям эксплуатации БПЛА.

### Метод определения многослойной структуры теплоизоляционной конструкции, обеспечивающей высокие показатели теплоизоляции

В научной работе [16] определялась структура распределения различных материалов и их взаимодействие между собой в элементе теплоизоляционной конструкции (ТК) для получения лучших результатов теплоизоляции. Из рассмотренных структур распределения материалов в элементе ТК наиболее лучшие результаты теплоизоляции получила конструкция с распределением материалов по слоям. Необходимое распределение слоев материалов в элементе ТК в работе [16] не определялось. При взаимодействии материалов между собой наиболее высокие результаты теплоизоляции получили те ТК, в которых участвовал материал с низкой теплопроводностью и малой плотностью, взаимодействующий с материалом, имеющим высокую плотность.

Причем прямое воздействие подаваемой температуры должно проходить на материал с низкой теплопроводностью и малой плотностью.

Для определения необходимого распределения слоев материалов в элементе ТК, обеспечивающей высокие показатели теплоизоляции, рассмотрим нестационарную теплопроводность элементов конструкций, область решения которых представлена на рис. 1.

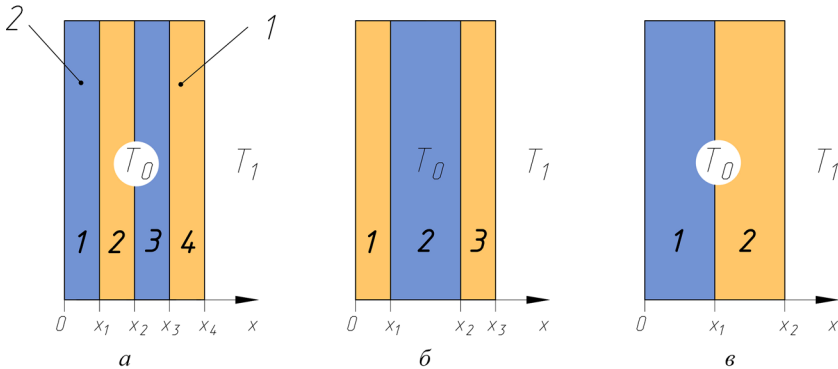


Рис. 1. Область решений ТК: а – четырехслойная ТК; б – трехслойная ТК; в – двухслойная ТК; 1 – минеральная вата; 2 – углеродистая сталь

Исследование нестационарной теплопроводности ТК проводится при воздействии температуры  $T_1 -50\text{ }^\circ\text{C}$  при начальной температуре конструкций  $T_0 +25\text{ }^\circ\text{C}$ . Время воздействия температуры  $t = 2$  часа. Толщину предлагаемой конструкции примем равную 20 мм.

При исследовании теплопроводности ТК принимаются допущения:

- между слоями материалов в ТК обеспечивается абсолютный контакт;
- характеристики теплопроводности материалов являются постоянными в пределах заданных температурных условиях.

Математическая постановка задачи теплопроводности различных ТК имеет следующий вид [17–19].

1. Уравнение теплопроводности для рассматриваемых конструкций:

– для четырехслойной ТК:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x_1 < x < x_2; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, x_2 < x < x_3; \\ \frac{\partial T_4}{\partial t} = a_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}, x_3 < x < x_4; \end{cases} \quad (1)$$

– для трехслойной ТК:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x_1 < x < x_2; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} = a_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, x_2 < x < x_3; \end{cases} \quad (2)$$

– для двухслойной ТК:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, 0 < x < x_1; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, x_1 < x < x_2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  – коэффициент температуропроводности; 1, 2, 3, 4 – нумерация слоев материала;  $x$  – координаты декартовой системы координат.

пературопроводности; 1, 2, 3, 4 – нумерация слоев материала;  $x$  – координаты декартовой системы координат.

2. Начальные условия имеют вид:

$$t = 0: T = T_0, 0 < x < x_2, x_3, x_4. \quad (4)$$

3. На границе  $x = x_2, x_3, x_4$  выполняется условие:

– для четырехслойной ТК:

$$x = x_4: T = T_1, t > 0; \quad (5)$$

– для трехслойной ТК:

$$x = x_3: T = T_1, t > 0; \quad (6)$$

– для двухслойной ТК:

$$x = x_2: T = T_1, t > 0. \quad (7)$$

4. На границе  $x = 0$  выполняется условие

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (8)$$

5. На границах между слоями материалов выполняются условия:

– для четырехслойной ТК:

$$\begin{cases} T_1(t, x_1) = T_2(t, x_1), \\ -\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=x_1} = -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=x_1}; \\ T_2(t, x_2) = T_3(t, x_2), \\ -\lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=x_2} = -\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{x=x_2}; \\ T_3(t, x_3) = T_4(t, x_3), \\ -\lambda_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{x=x_3} = -\lambda_4 \left. \frac{\partial T_4}{\partial x} \right|_{x=x_3}; \end{cases} \quad (9)$$

– для трехслойной ТК:

$$\begin{cases} T_1(t, x_1) = T_2(t, x_1), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_1}; \\ T_2(t, x_2) = T_3(t, x_2), \\ -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_2}; \end{cases} \quad (10)$$

– для двухслойной ТК:

$$\begin{cases} T_1(t, x_1) = T_2(t, x_1), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=x_1}. \end{cases} \quad (11)$$

Краевые задачи для уравнений (1)–(3) с учетом начальных и граничных условий (4)–(11) решались конечно-разностным методом на равномерной сетке  $1 \times 200$  с шагом 0.0001 с использованием неявной схемы [20].

### Результаты определения многослойной структуры ТК, обеспечивающей высокие показатели теплоизоляции

Представленные на рис. 2, 3 и в табл. 1 результаты исследования теплопроводности ТК с различными вариантами исполнений показывают, что наиболее высокие показатели теплоизоляции при воздействии отрицательной температуры при временном воздействии 2 часа имеют ТК в исполнении № 2.3 и ее вариантов. Температура на границе  $x = 0$  дан-

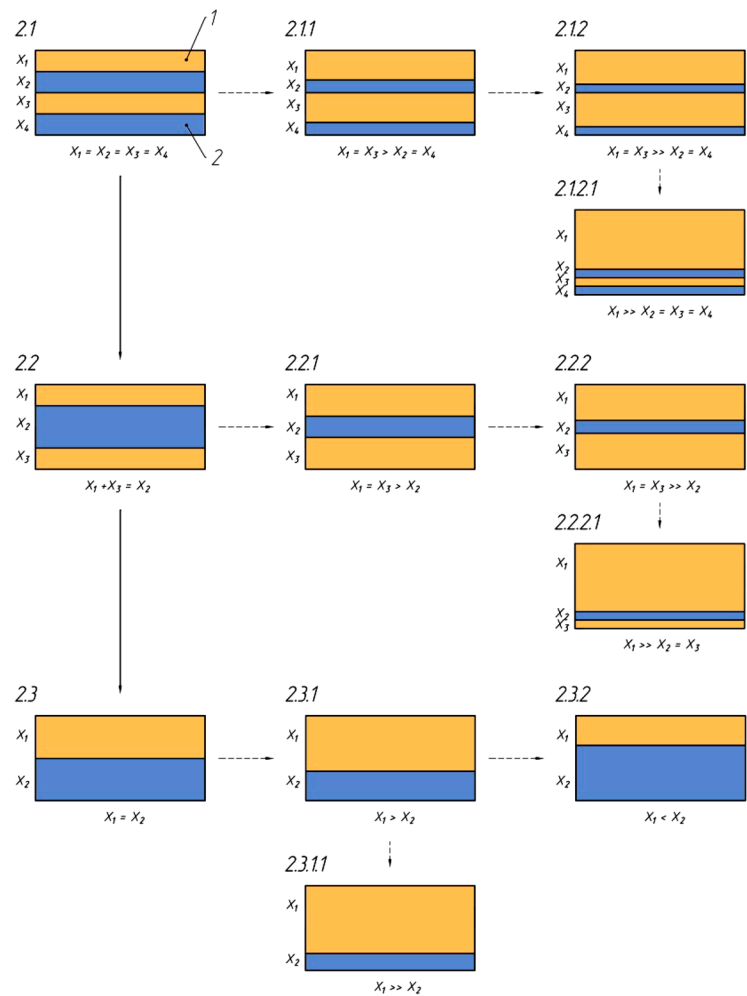


Рис. 2. Схема формирования оптимальной ТК по массе и теплоизоляции: 1 – теплоизоляционный материал; 2– углеродистая сталь

ных ТК для исполнений: № 2.3 опустилась на 43 °С; № 2.3.1 опустилась на 47 °С; № 2.3.1.1 опустилась на 54 °С; № 2.3.2 опустилась на 48 °С.

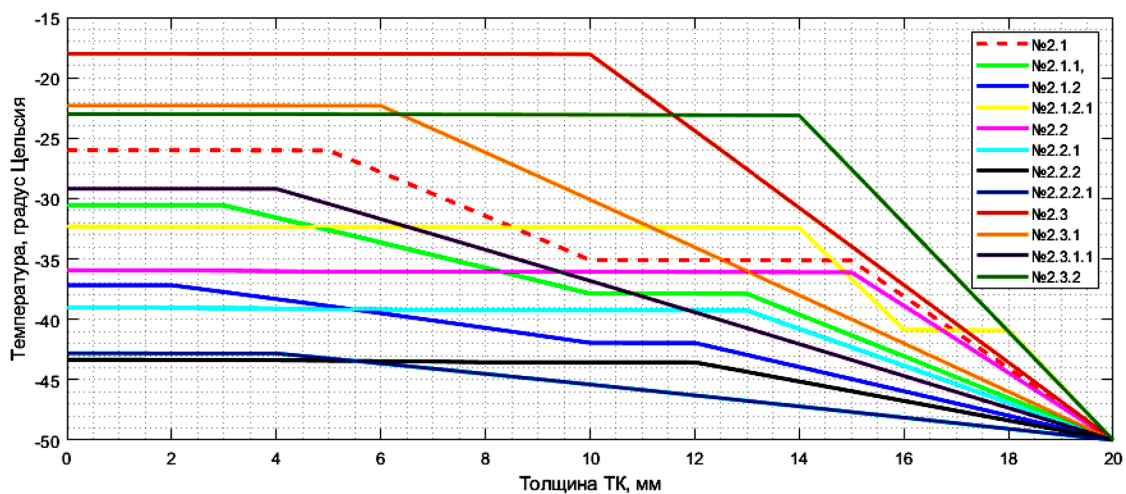


Рис. 3. Результаты исследования теплопроводности вариантов исполнений ТК при временном воздействии температуры

Наиболее незначительные результаты исследования имеют ТК в исполнении № 2.2 и ее вариантов. Температура на границе  $x = 0$  этого исполнения и ее вариантов опускается на 61–68 °С. Если учитывать массу и теплоизоляционные показатели ТК, то наиболее оптимальным вариантом выявляется ТК исполнения № 2.3.1.1, масса которого на  $1 \text{ м}^2$  составляет 34 кг.

Таблица 1. Показатели теплоизоляции и массы ТК

№ ТК	Температура на границе $x = 0$ , °С	Масса ТК, кг на $1 \text{ м}^2$
2.1	-26	80
2.2	-36	
2.3	-18	
2.1.1	-30	50
2.2.1	-39	
2.3.1	-22	
2.1.2	-37	34
2.1.2.1	-32	
2.2.2	-43	
2.2.2.1	-42	
2.3.1.1	-29	
2.3.2	-23	
		110

**Метод определения  
теплофизических характеристик  
материалов ТК, обеспечивающих  
оптимальные показатели  
массы и теплоизоляции**

Как показали предыдущие исследования, при уменьшении толщины задействованного материала в виде углеродистой стали теплоизоляционные показатели ТК падают, как и ее масса. Решение данной проблемы можно найти в неоднородности материала. Таким образом, рассмотрим углеродистую сталь в виде сетки, которая имеет двунаправленную прямоугольную схему армирования.

Для получения высоких показателей теплоизоляции и малой массы ТК проведем исследование теплопроводности ТК со слоем армирующего материала различной пористости (табл. 2). Область решения исследования представлена на рис. 4.

Таблица 2. ТК в зависимости от пористости слоев армирующего материала в нем

№ ТК	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
Пористость слоев армирующего материала в ТК, %	10	30	50	70	90	95

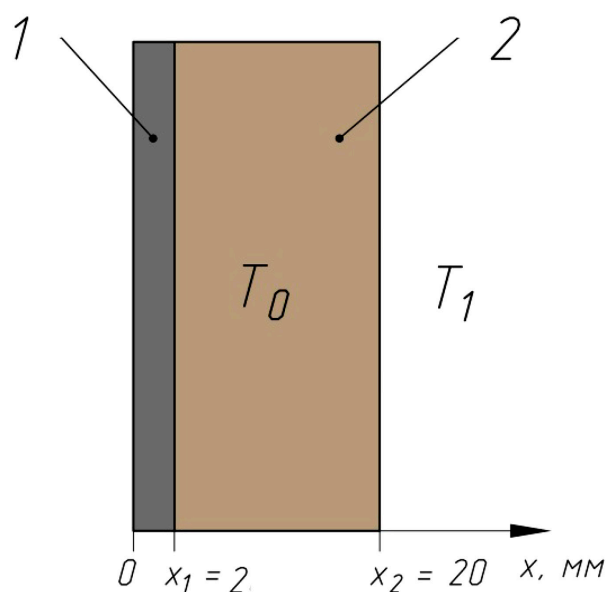


Рис. 4. Область решений ТК: 1 – слой армирующего материала; 2 – теплоизоляционный материал (минеральная вата)

Как и в предыдущем исследовании, математическая постановка задачи теплопроводности ТК состоит из уравнения (3) и начальных, граничных условий (4), (7), (8), (11). Задача решалась конечно-разностным методом на равномерной сетке  $1 \times 200$  с шагом 0,0001 с использованием неявной схемы.

Для увеличения показателей теплоизоляции материала в качестве вещества пор армируемого материала рассмотрим герметик, обладающий высокой удельной теплоемкостью.

Теплофизические характеристики армирующего материала определялись по следующим формулам:

– эффективный коэффициент теплопроводности  $\lambda$  [21]:

$$\lambda = \lambda_1 \left[ m_2^2 v + (1 - m_2)^2 + \frac{4vm_2(1 - m_2)}{1 + v} \right], \quad (12)$$

где  $\lambda_1$  – теплопроводность волокон;  $m_2$  – пористость армирующего материала;  $v = \lambda_2/\lambda_1$ , а  $\lambda_2$  – теплопроводность вещества пор;

– плотность  $\rho$  [21]:

$$\rho = \rho_2 m_2 + \rho_1 (1 - m_2), \quad (13)$$

где  $\rho_1$  – плотность волокна;  $\rho_2$  – плотность вещества пор;

– удельная теплоемкость  $c$ :

$$c = c_2 m_2 + c_1 (1 - m_2), \quad (14)$$

где  $c_1$  – удельная теплоемкость волокна;  $c_2$  – удельная теплоемкость вещества пор.

**Результаты определения  
теплофизических характеристик  
материалов ТК, обеспечивающих  
оптимальные показатели  
массы и теплоизоляции**

Результаты исследования теплопроводности ТК с различными вариантами пористости армирующего материала, входящего в ТК, представлены на рис. 5.

Результаты данного исследования показывают, что выбор ТК с оптимальными параметрами массы и низкой теплопроводностью не очевиден. Для выбора ТК проведем исследования нестационарной теплопроводности аналогов конструкций при толщинах, необходимых для получения показателей теплопроводности ТК № 3.4 (пористость армирующего материала в ТК составляет 70 %). Область решения данной задачи представлена на рис. 6. Следует отметить, что в качестве аналогов ТК рассматривается именно слой теплоизоляционного материала, а не вся конструкция, поскольку из опре-

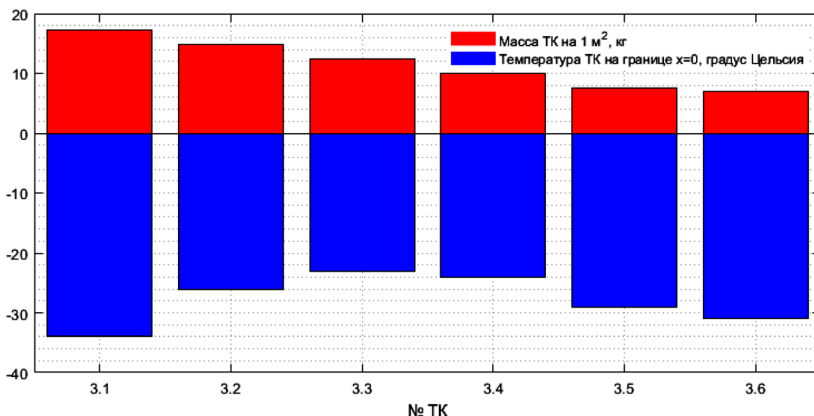


Рис. 5. Результаты исследования теплопроводности ТК с различными вариантами пористости армирующего материала, входящего в него

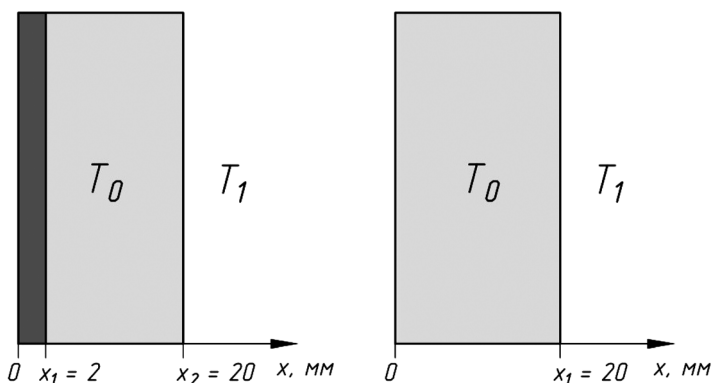


Рис. 6. Область решения задачи

деления ТК и его конструктива, используемого в авиастроении, теплоизоляция обеспечивается именно теплоизоляционным слоем материала. Все остальные слои, применяемые в ТК, служат в качестве защитного покрытия.

В качестве теплоизоляционных конструкций рассматриваются материалы с физическими свойствами, представленными в табл. 3.

Таблица 3. Характеристики теплоизоляционных материалов

Материал	№	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	Плотность, кг/м²
Минеральная вата	4.1	0.045	160
Стекловата	4.2	0.046	85
Вспененный пенополистирол	4.3	0.04	40
Пенополиуретан	4.4	0.04	200

Результаты исследования теплопроводности ТК и материалов, представленные на рис. 7, показывают, что введение слоев армирующего материала в ТК способствует

главным образом уменьшению толщины ТК, не изменяя при этом ее показатели теплоизоляции. Лучшие показатели по теплоизоляции, толщине и по массе имеют конструкции, в которых задействован слой теплоизоляционного материала, имеющий высокую плотность. Как, например, ТК № 3.4 со слоями материалов в нем № 4.1 и № 4.4:

1) для получения показателей теплопроводности ТК № 3.4 с материалом в нем № 4.1 материалу № 4.1, без использования армирующего материала, необходима толщина, которая составляет 70 мм, а масса 11 кг, что в 3.5 раза больше по толщине и в 1.1 раза больше по массе;

2) для получения показателей теплопроводности ТК № 3.4 с материалом в нем № 4.4 материалу № 4.4 без использования армирующего материала необходима толщина,

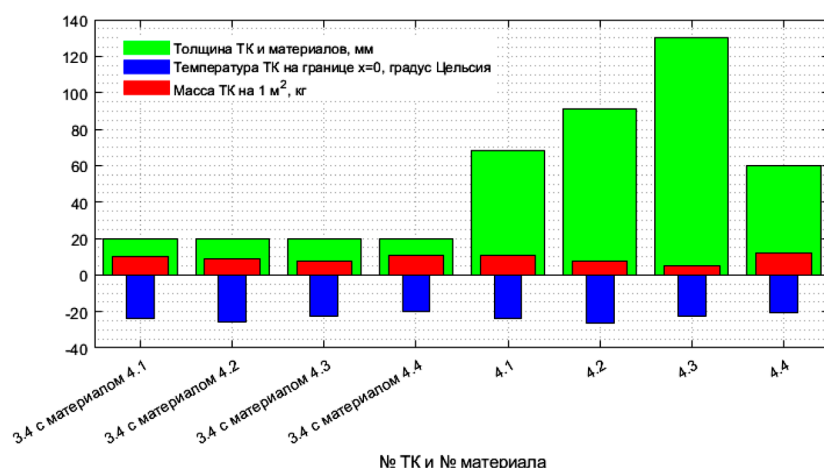


Рис. 7. Результаты теплопроводности ТК и материалов

которая составляет 60 мм, а масса 12 кг, что в три раза больше по толщине и в 1.2 раза больше по массе.

Худшие показатели с точки зрения массы, но также выигрывающие по толщине, имеют конструкции, где задействован слой теплоизоляционного материала, имеющий низкую плотность. Как, например, ТК № 3.4 со слоями материалов в нем № 4.2 и 4.3:

1) для получения показателей теплопроводности ТК № 3.4 с материалом в нем № 4.2 материалу № 4.2, без использования армирующего материала, необходима толщина, которая составляет 90 мм, а масса 8 кг, что в 4.5 раза больше по толщине и в 1.1 раза меньше по массе;

2) для получения показателей теплопроводности ТК № 3.4 с материалом в нем № 4.3 материалу № 4.3 без использования армирующего материала необходима толщина, которая составляет 60 мм, а масса 12 кг, что в 6.5 раза больше по толщине и в 1.5 раза меньше по массе.

Дальнейшее повышение пористости армирующего материала, участвующего в ТК, сопровождается уменьшением показателя теплоизоляции, как и массы для всех рассмотренных ТК и материалов.

### Заключение

Рассмотренные в работе теоретические исследования отражают разработку теплоизоляционных средств защиты БПЛА. Для обеспечения температурного режима БПЛА, функцио-

нирующего в условиях Арктики, в качестве его теплоизоляции, необходимо использовать конструкции в виде, представленном на рис. 2, под № 2.3.

Для уменьшения массы данной ТК, не ухудшая ее теплоизоляционные показатели, необходимо, чтобы материалы с высокой теплопроводностью, участвующие в ТК, имели пористую структуру. Данное решение позволяет варьировать и комбинировать теплофизические характеристики наполнителя и связующего до необходимых

в зависимости от взаимодействия применяемых материалов.

Данные решения и условия построения ТК приводят к уменьшению толщины (в качестве примера можно привести рассмотренные современные аналоги конструкций), в 3–6 раз не изменяя их теплоизоляционных показателей.

### Список источников

1. Кузнецов И.Е., Мельников А.В., Рогозин Е.А., Страшко О.В. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа // Вестник Дагестанского технического университета. Технические науки. 2018. Т. 45. № 2. С. 125–139. DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139
2. Рогозин Е.А., О.И. Бокова, Мельников А.В. Основные аспекты совершенствования методики оценки эффективности функционирования беспилотного летательного аппарата в условиях обледенения // Вестник Воронежского института МВД России. 2019. № 3. С. 21–33.
3. Клименков Г.П., Приходько Ю.М., Пузырев Л.Н., Харитонов А.М. Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 4. С. 563–572.
4. Горбунов А.А., Галимов А.Ф. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полета беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала // Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России. 2016. № 1. С. 7–15.
5. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Максимов В.Г., Бабашов В.Г. Звукотеплоизолирующий материал градиентной структуры ВТИ-22 // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 47–49.
6. Авиационные материалы: Справочник в 13 томах. Т. 9. Теплозащитные, теплоизоляционные и композиционные материалы, высокотемпературные неметаллические покрытия. Москва, 2011. 31 с.
7. Тарасов В.А., Тимофеев М.П., Ермакова Ю.В., Боярская Р.В. Анализ свойств и особенностей функцио-

- нирования высокопористых теплоизоляционных материалов на основе базальтового волокна // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». 2013. № 4 (93). С. 120–129.
8. **Гращенков Д.В., Балинова Ю.А., Тинякова Е.В.** Керамические волокна оксида алюминия и материалы на их основе // Стекло и керамика. 2012. № 4. С. 32–36.
  9. **Кузнецов С.П.** Конкретная авиатехника. Самолет Як-42. Санкт-Петербург, 2022. 345 с.
  10. **Волошин Ф.А., Кузнецов А.Н.** и др. Самолет Ту-154. Конструкция и техническое обслуживание. Книга 1. Москва, 1975. 291 с.
  11. **Задорожный Я.Н., Мамошин П.Н.** Конструкция и летная эксплуатация самолета Ан-24. Москва, 1980. 142 с.
  12. **Антонов О.К.** Пассажирский самолет АН-14. Техническое описание. 2-е изд. Москва, 1964. 195 с.
  13. **Данилов В.А.** Вертолет МИ-8. Устройство и техобслуживание. Москва, 1988. 278 с.
  14. **Monroe William Shumate, James W Stacy.** Reinforced Insulation Product and System Suitable for Use in an Aircraft. Patent U.S. 7278608 B2, Int. Cl. B 64 C 1/00. No. 11/167'864 (2007).
  15. Конструктивный компонент фюзеляжа самолета или космического летательного аппарата со слоем пены в качестве теплоизоляции: патент Российская Федерация / Колах Микаел, Вентцел Ханс-Петер, Дольцински Вольф-Дитрих, Херман Ральф. – № 2009124191/11; заявл. 18.01.2008; опубл. 20.09.2012. Бюл. № 26.
  16. **Маскайкин В.А., Махров В.П.** Исследование конвективного теплообмена структурированного, неоднородного элемента, служащего как теплоизоляционный слой обшивки авиационных изделий // Тепловые процессы в технике. 2021. Т. 13. № 5. С. 230–237. DOI: 10.34759/tpt-2021-13-5-230-23
  17. **Кузнецов Г.В., Шеремет М.А.** Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие. Томск, 2007. 172 с.
  18. **Крайнов А.Ю., Миньков Л.Л.** Численные методы решения задач тепло- и массопереноса: учебное пособие. Томск, 2016. 92 с.
  19. **Самарский А.А., Вабищевич П.Н.** Вычислительная теплопередача. Москва, 2003. 785 с.
  20. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. Москва, 1989. 616 с.
  21. **Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П.** Теплопроводность смесей и композиционных материалов: справочная книга. Ленинград, 1974. 264 с.
  22. wind tunnels. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2008, vol. 15, no. 4, pp. 563–572. (In Russ.)
  4. **Gorbunov A.A., Galimov A.F.** The influence of meteorological factors on the use and flight safety of unmanned aerial vehicle with side repeater radio. *Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia*, 2016, no. 1, pp. 7–15. (In Russ.)
  5. **Sytyy YU.V., Sagomonova V.A., Maksimov V.G., Babashov V.G.** VTI-22 sound and thermal insulation material of gradient structure. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2013, no. 2, pp. 47–49. (In Russ.)
  6. Aviacionnye materialy [Aircraft materials]. Spravochnik v 13 tomah. Т. 9. Teplozashhitnye, teploizoljacionnye i kompozicionnye materialy, vysokotemperaturnye nemetallicheskie pokrytija [Heat protection, thermal insulation and composite materials, hightemperature non-metallic coatings]. Moscow, 2011, 31 p. (In Russ.)
  7. **Tarasov V.A., Timofeyev M.P., Yermakova Yu.V., Boyarskaya R.V.** Analysis of Properties and Peculiarities of Functioning of Highly Porous Insulating Materials Based on Basalt Fibe. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2013, no. 4 (93), pp. 120–129. (In Russ.)
  8. **Grashchenkov D.V., Balinova Yu.A., Tinyakova E.V.** Keramicheskiye volokna oksida alyuminiya i materialy na ikh osnove [Aluminum oxide ceramic fibers and materials based on them, Glass and Ceramics]. *Glass and Ceramics*, 2012, no. 4, pp. 32–36. (In Russ.)
  9. **Kuznetsov S.P.** Konkretnaya aviatekhnika. Samolet Yak-42 [Specific aviation technology. Aircraft Yak-42]. Saint-Petersburg, 2022, 345 p. (In Russ.)
  10. **Voloshin F.A., Kuznetsov A.N.** et al. Samolet Tu-154. Konstruktsiya i tekhnicheskoye obsluzhivaniye. Kniga 1 [Tu-154 aircraft. Construction and maintenance. Book 1]. Moscow, 1975, 291 p. (In Russ.)
  11. **Zadorozhnyi YA.N., Mamoshin P.N.** Konstruktsiya i letnaya ekspluatatsiya samoleta An-24 [Design and flight operation of the An-24 aircraft]. Moscow, 1980, 142 p. (In Russ.)
  12. **Antonov O.K.** Passazhirskiy samolet AN-14. Tekhnicheskoye opisaniye [Passenger aircraft AN-14. Technical description]. Moscow, 1964, 195 p. (In Russ.)
  13. **Danilov V.A.** Vertolet MI-8. Ustroystvo i tekhnicheskoye obsluzhivaniye [Helicopter MI-8. Device and maintenance]. Moscow, 1988, 278 p. (In Russ.)
  14. **Monroe William Shumate, James W Stacy.** Reinforced Insulation Product and System Suitable for Use in an Aircraft. Patent U.S. 7278608 B2, Int. Cl. B 64 C 1/00. No. 11/167'864 (2007).
  15. **Kolakh Mikael, Venttsel Khans-Peter, Dol'tsinski Vol'f-Ditrikh, Kherman Ral'f.** Konstruktivnyi komponent fyuzel'nyazha samoleta ili kosmicheskogo letatel'nogo apparata so sloem peny v kachestve teploizolyatsii [Aircraft or spaceship structural component with heat-insulating foam layer]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2009124191/11 (2012).
  16. **Maskaykin V.A., Makhrov V.P.** The study of convective heat transfer structured, inhomogeneous element serving as a heat-insulating layer for the skin of aircraft products. *Thermal processes in engineering*, 2021, vol. 13, no. 5, pp. 230–237. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2021-13-5-230-23
  17. **Kuznecov G.V., Sheremet M.A.** Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti [Difference methods for solving heat conduction problems]. Tomsk, 2007, 172 p. (In Russ.)
  18. **Krainov A.Yu., Minkov L.L.** Chislennyye metody resheniya zadach teplomassoobmena [Numerical methods for solving

## References

1. **Kuznetsov I.E., Melnikov A.V., Rogozin E.A., Strashko O.V.** Methodology for accounting the influence of meteorological factors on the efficiency of application of unmanned aerial vehicles on the basis of system analysis. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*, 2018, 45 (2), pp. 125–139. (In Russ.). DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-125-139
2. **Rogozin E.A., Bokova O.I., Melnikov A.V.** Main aspects of improving the methodology for estimating the efficiency of functioning of unmanned aerial vehicles under conditions. *The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2019, no. 3, pp. 21–33. (In Russ.)
3. **Klimenkov G.P., Prikhod'ko Yu.F., Puzyrev L.N., Kharitonov A.M.** Modelling of icing of flying vehicles in climatic



- problems of heat and mass transfer]. Tomsk, 2016, 92 p. (In Russ.)
19. **Samarskij A.A., Vabishhevich P.N.** Vychislitel'naja teploperedacha [Computational heat transfer]. Moscow, 2003, 785 p. (In Russ.)
20. **Samarsky A.A.** Teoriya raznostnykh skhem [Theory of difference schemes]. Moscow, 1989, 616 p. (In Russ.)
21. **Dul'nev G.N., Zarichnyak YU.P.** Teploprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov [Thermal conductivity of mixtures and composite materials]. Leningrad, 1974, 264 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 07.11.2022; одобрена после рецензирования 10.01.2023; принята к публикации 14.02.2023.

The article was submitted on 07.11.2022; approved after reviewing on 10.01.2023; accepted for publication on 14.02.2023.