

Научная статья  
УДК 62-977  
DOI: 10.34759/vst-2021-4-118-130

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МНОГОСЛОЙНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОЙ ОБШИВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИИ ПОЛЕТА

Владимир Андреевич Маскайкин<sup>1</sup> ✉, Владислав Петрович Махров<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,  
Москва, Россия

<sup>1</sup>vladimir.maskaykin@mail.ru ✉

<sup>2</sup>v\_machrov@rambler.ru

**Аннотация.** Рассматривается одна из актуальных задач – увеличение теплоизоляционных характеристик летательных аппаратов, эксплуатируемых в экстремальных температурах. Исследуется теплообмен построенной многослойной конструкции, которая должна отвечать высоким показателям теплоизоляции в условии полета, где возникают предельно высокие температуры. По результатам теоретического исследования теплопроводности многослойной конструкции были получены высокие показатели ее теплоизоляции и проведено ее сравнение с теплоизоляцией аналогов.

**Ключевые слова:** многослойная теплоизоляционная конструкция, композиционные полимерные материалы, пористые материалы, теплоизоляция, нестационарная теплопроводность, системы термостатирования

**Для цитирования:** Маскайкин В.А., Махров В.П. Исследование теплопроводности многослойной теплоизоляционной обшивки летательных аппаратов в условии полета // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 4. С. 118—130. DOI: 10.34759/vst-2021-4-118-130

Original article

## THERMAL CONDUCTIVITY RESEARCH OF THE AIRCRAFT HEAT-INSULATING SKIN UNDER FLIGHT CONDITIONS

Vladimir A. Maskaykin<sup>1</sup> ✉, Vladislav P. Makhrov<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, Moscow, Russia

<sup>1</sup>vladimir.maskaykin@mail.ru ✉

<sup>2</sup>v\_machrov@rambler.ru

## Abstract

The theoretical studies considered in this work reflect the development of thermal insulation protective means applied on the aircraft. The purpose of the work consists in studying the possibilities of enhancing thermal insulation characteristics of the aircraft being operated under extreme temperatures. Namely, the article tackles the option of a multilayer structure suggested as a thermal insulator for its application on the aircraft. This structure consists of the composite material layers, porous material and aluminum-magnesium alloy layers. Theoretical study of heat exchange of this structure and existing thermal insulating structures employed on the aircraft is being conducted for comparison and evaluation of the considered multilevel structure application effectiveness.

The extreme temperatures are being determined in this work from the aircraft flight mode conditions, at which these excessively high temperatures occur.

The thermal conductivity studies of the proposed multilayer structure and conventional heat-insulating structures considered in this work were being performed numerically by the finite-difference method.

The numerical study results of the unsteady thermal conductivity revealed that a multilayer structure was twelve times superior in thermal insulation to all other existing thermal insulation structures considered in the work. Besides, the results of studying thermal conductivity of the structures under consideration demonstrate that:

- The layers of materials in the element do not operate separately from each other, but they all operate in the common heat exchange system;
- The monotony of the temperature distribution in the elements depends on the of the materials' thermal conductivity coefficients ratio.

The results of this work may be recommended for application in real designs of the state-of-the-art aircraft.

**Keywords:** multilayer thermal insulation structure, composite polymer materials, porous materials, thermal insulation, non-stationary thermal conductivity, thermal conditioning systems.

**For citation:** Maskaykin V.A., Makhrov V.P. Thermal conductivity research of the aircraft heat-insulating skin under flight conditions. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 4, pp. 118–130. DOI: 10.34759/vst-2021-4-118-130

## Введение

Чтобы обеспечить уменьшение процесса теплопередачи и термического сопротивления летательного аппарата (ЛА), существует большое разнообразие конструкторских и инженерных решений. Например, задачу по поддержанию эксплуатационной температуры ЛА решают путем использования систем термостатирования [1]. Также проводятся работы по исследованию и созданию материалов и конструкций, обеспечивающих эксплуатационную температуру ЛА или его агрегатов, находящихся в условиях экстремальных температурных режимов [2–4]. Теплоизоляция в таких материалах и конструкциях достигается путем введения различных схем армирования, дисперсности материалов, а также структуры построения материалов в конструкции [5–7].

В данной работе проводится исследование предлагаемой в качестве теплоизолятора многослойной конструкции. Определяются преимущества и актуальность использования в ЛА рассмат-

риваемой конструкции с существующими теплоизоляционными материалами и конструкциями.

## 1. Метод исследования и описание исследуемого предмета

Рассматриваемая многослойная конструкция, которая представлена на рис. 1, состоит из комбинации слоев:

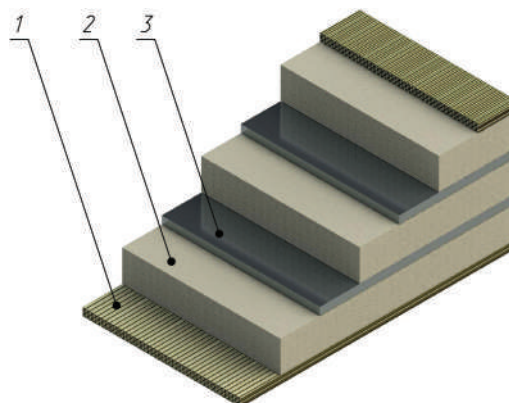


Рис. 1. Рассматриваемая многослойная конструкция

- стеклопластика 1;
- минеральной ваты 2;
- алюминий-магниевого сплава 3.

Для сравнения и оценки эффективности использования рассматриваемой многослойной конструкции проводится теоретическое исследование теплообмена данной конструкции и существующих теплоизоляционных конструкций, используемых в ЛА в качестве теплоизоляторов [8–14].

Из композиционных полимерных материалов рассматривается теплопроводность углепластиков, стеклопластиков в совокупности с минеральными, стекловолоконными, полимерными, пористыми негорючими материалами. Теплоизоляционные характеристики данных материалов представлены в табл. 1 [15–18].

Для исследования теплообмена конструкций, определим внешние факторы, действующие на ЛА в полете. Рассмотрим, например, режим полета ЛА, в котором возникают экстремальные температуры, а именно при режиме полета ЛА с числом Маха, равным 2,5 на высоте 12 км. При

таком режиме полета основными факторами, действующими на ЛА, являются аэродинамический нагрев и радиационное тепло, параметры которых указаны в табл. 2 [19].

Чтобы провести исследования нестационарной теплопроводности конструкций, рассмотрим область решения задачи, представленной на рис. 2. В область решения задачи входят: образец многослойной конструкции (ОМК) (рис. 2,а); образец конструктивного элемента (ОКЭ) в комбинации различных материалов (рис. 2,б); ОКЭ со сплошным материалом (рис. 2,в). Толщины данных конструктивных элементов (КЭ) зададим одинаковыми, равными 16 мм ( $Y$ ), ширина КЭ 20 мм ( $X$ ), начальная температура  $T_0 = 25^\circ\text{C}$ . При исследовании теплообмена КЭ принимаются допущения: между слоями материалов в КЭ обеспечивается абсолютный контакт; характеристики теплопроводности материалов (табл. 2) являются постоянными в пределах заданных температурных условиях; степень черноты  $\epsilon$  задана для всех материалов одинаковой,  $\epsilon = 0,9$ .

Таблица 1

Теплоизоляционные характеристики материалов

Материал	Характеристики		
	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C)	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)
Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем	140	840	0,039
Плиты из стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем	190	840	0,057
Плиты из резольноформальдегидного пенопласта	80	1680	0,044
Углеродное волокно	1800	1100	100
Стекловолокно	2500	840	1
Терморреактивная смола	1400	900	0,2
Алюминий-магний-магний сплав	2670	920	188

Таблица 2

Параметры внешних факторов

Параметр	Значение
Температура воздуха в пограничном слое $T_{\text{ПС}}$ , °C	300
Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·°C)	410
Тепловой поток солнечного излучения $J_0$ , Вт/м <sup>2</sup>	1200
Инфракрасная часть солнечной энергии $\text{Inf}$ , %	51

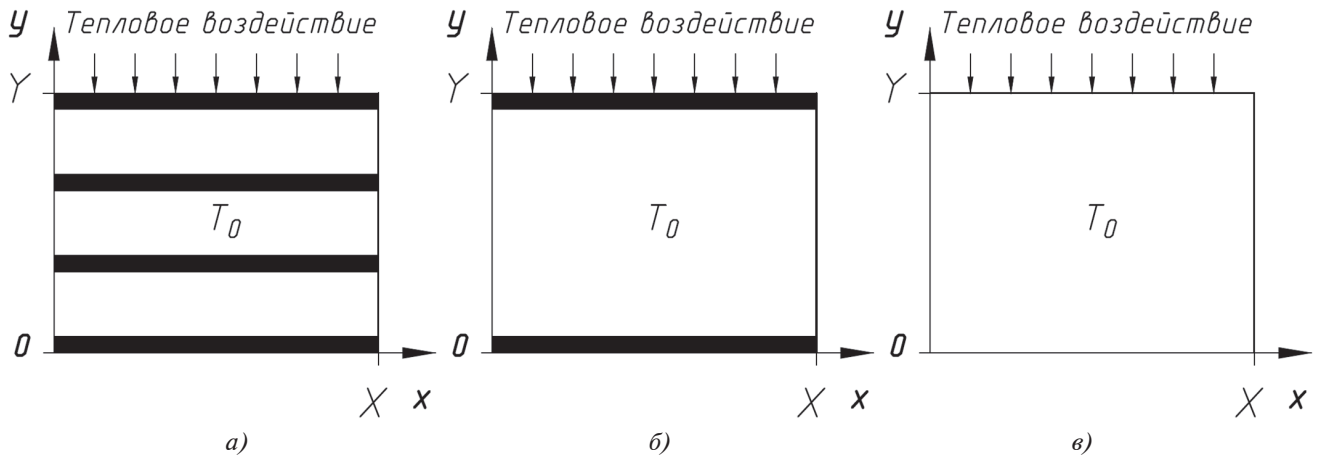


Рис. 2. Область решения задачи

**2. Численные исследования теплообмена рассматриваемых КЭ**

Общая математическая постановка задачи нестационарной теплопроводности КЭ имеет вид [20]:

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

где  $n$  – количество распределений в КЭ, зависящее от введенных характеристик материалов;  $t$  – время;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $c$  – удельная теплоемкость материала.

Для сформулированной задачи (1) начальные условия имеют вид:

$$T(x, y, 0) = T_0. \quad (2)$$

Задаются следующие граничные условия:

– на границе  $y = Y$  при  $0 \leq x \leq X$  выполняется условие

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T_{\text{ПС}} - T) + \varepsilon \sigma (T_{\text{ПС}}^4 - T^4) + J_0 \text{Inf} \varepsilon; \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad (4)$$

– на границах между слоями материалов выполняются условия

$$\begin{cases} T_n(t, x, y) = T_{n+1}(t, x, y), \\ -\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial y} = -\lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial y}; \end{cases} \quad (5)$$

– на границах  $x = 0, X$  задается условие

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=X}. \quad (6)$$

Краевая задача для уравнения (1) с учетом (2)–(6) решалась конечно-разностным методом

на равномерной сетке с использованием неявной двухслойной схемы [21, 22]. Для численного решения краевой задачи для уравнения (1) применялась локально-одномерная схема Самарского [23]. Дискретизация конвективных и лучистых слагаемых проводилась на основе монотонной аппроксимации Самарского [23].

Поскольку в исследовании участвуют композиционные материалы, требуется определить их характеристики.

Для упрощения определения теплопроводности композиционного материала рассматривается его двунаправленная прямоугольная схема армирования. Исходя из этого коэффициент теплопроводности будет определяться по формуле [24]:

$$\lambda = \lambda_1 \left[ m_2^2 v + (1 - m_2)^2 + \frac{4vm_2(1 - m_2)}{1 + v} \right], \quad (7)$$

где  $\lambda_1$  – теплопроводность волокон;  $m_2 = 0,5$  – пористость ткани;  $v = \lambda_2 / \lambda_1$ ;  $\lambda_2$  – теплопроводность вещества пор.

Плотность композиционного материала определяется по формуле [20]:

$$\rho = \rho_2 m_2 + \rho_1 (1 - m_2), \quad (8)$$

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

Аналогично определяется теплоемкость композиционного материала:

$$c = c_2 m_2 + c_1 (1 - m_2). \quad (9)$$

**2.1. Результаты численного исследования теплообмена рассматриваемых КЭ**

Результаты численного исследования нестационарного теплообмена КЭ показывают, что

ОМК (см. рис. 1) превосходит по теплоизоляции все остальные аналоги (табл. 3). А именно за один час теплового воздействия температура ОМК на границе  $y = 0$  увеличилась на  $0,3^\circ\text{C}$ . В остальных рассматриваемых ОКЭ (см. рис. 2, б и в) на границе  $y = 0$  наблюдается увеличение температуры до  $300^\circ\text{C}$  за 10 мин.

Следует отметить, что температуры на границах  $y = 0$  и  $y = 16$  мм у каждого КЭ различны (см. табл. 3). Например, ОКЭ со сплошным материалом — углепластик — за время теплового воздействия 10 с имеет температуры на границах  $y = 0$  и  $y = 16$  мм  $48,3^\circ\text{C}$  и  $79,4^\circ\text{C}$ . А ОКЭ с углепластиком в комбинации с минеральной ватой имеет температуры  $38,5^\circ\text{C}$  и  $109,3^\circ\text{C}$ . Это говорит о том, что слои материалов в КЭ участвуют в работе не отдельно друг от друга, а в общей системе теплообмена [25].

Результаты численного исследования нестационарного теплообмена КЭ в графическом виде представлены на рис. 3—8.

Из полученных результатов следует, что монотонность распределения температуры в КЭ зависит от отношения коэффициентов теплопро-

водности материалов. Так, на рис. 7, а, распределение температуры в ОКЭ происходит монотонно, поскольку отношение коэффициентов теплопроводности стеклопластика к стеклянному штапельному волокну равно 8. Противоположные результаты имеет ОКЭ, указанный на рис. 8, а. Отношение коэффициентов теплопроводности углепластика к стеклянному штапельному волокну равно 443.

Результаты ОКЭ с комбинацией стеклопластика и минеральной ваты, резольнофенолформальдегидным пенопластом не показаны, поскольку градиент температур однотипен ОКЭ, указанному на рис. 7, а, б, в, и значения температур на границах  $y$  этих ОКЭ практически одинаковы (табл. 3).

Результаты ОКЭ с комбинацией углепластика и минеральной ватой, резольнофенолформальдегидным пенопластом также не указаны.

## Выводы

Рассмотренные теоретические исследования отражают разработку теплоизоляционных защитных средств, применяемых в ЛА. Был рассмотрен вариант теплоизоляционной многослойной

Таблица 3

Результаты теплообмена КЭ при тепловом воздействии

Исследуемые КЭ	Временное тепловое воздействие, с		
	10	600	3600
	Температура на границе $y = 0; 16$ мм		
Многослойная конструкция	25;156,6	25;157,5	25,3;161,4
Стеклопластик	25;209	161,1;289,6	301,3;301,3
Углепластик	48,3;79,4	301;301,1	301,3;301,3
Минеральная вата на синтетическом связующем	25;293	197,5;300,5	301,1;301,3
Стекланные штапельные волокна на синтетическом связующем	25;289,6	206;300,3	301,3;301,3
Резольнофенолформальдегидный пенопласт	25;291,8	195,7;300,5	301,3;301,3
Стеклопластик в комбинации с стеклянным штапельным волокном	25;213	285;300	301,3;301,3
Стеклопластик в комбинации с минеральной ватой	25;213,2	284;300	301,3;301,3
Стеклопластик в комбинации с резольнофенолформальдегидным пенопластом	25;213	284,6;300	301,3;301,3
Углепластик в комбинации со стеклянным штапельным волокном	43;109,3	301,3;301,3	301,3;301,3
Углепластик в комбинации с минеральной ватой	38,5;109,3	301,3;301,3	301,3;301,3
Углепластик в комбинации с резольнофенолформальдегидным пенопластом	39,8;109,3	301,3;301,3	301,3;301,3

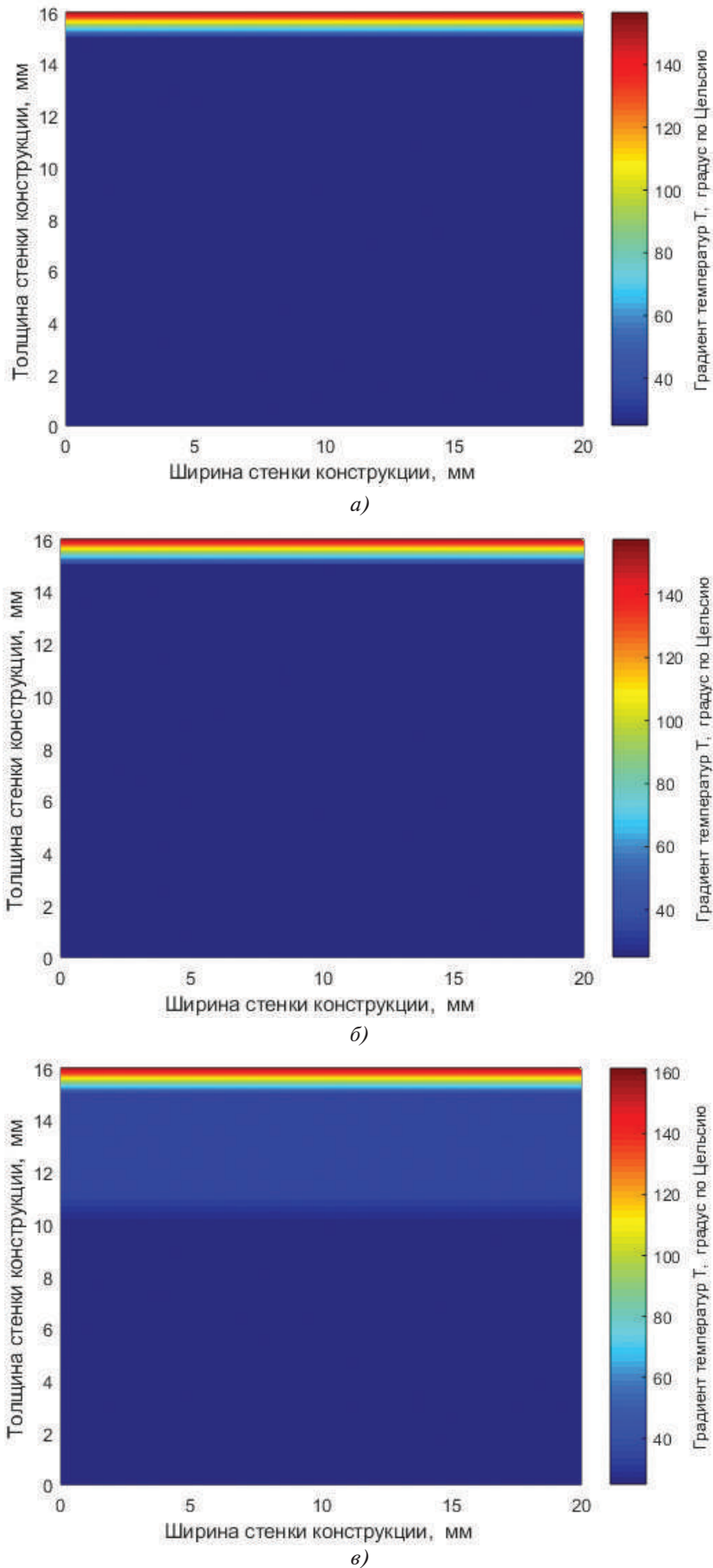


Рис. 3. Градиент температур ОМК при временном тепловом воздействии: а — 10 с; б — 600 с; в — 3600 с

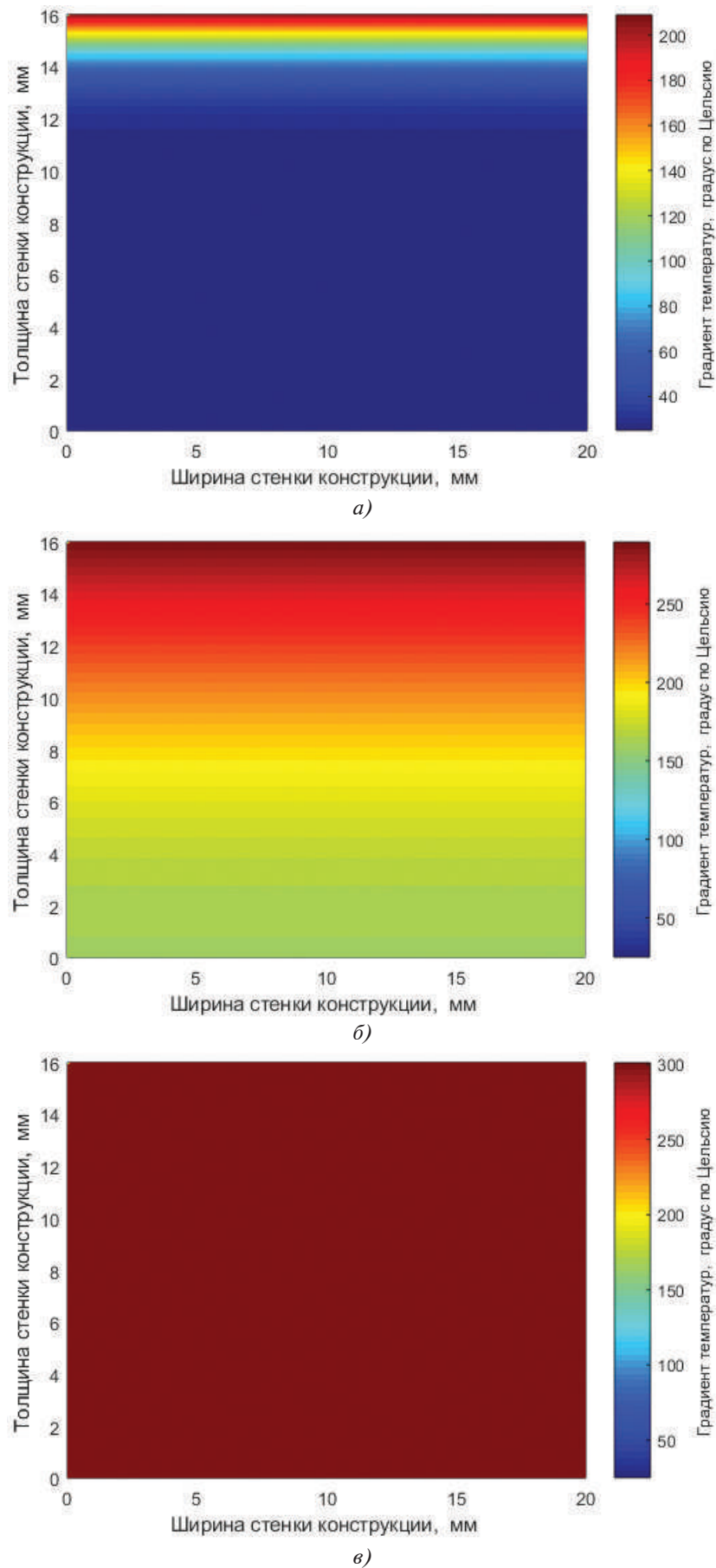


Рис. 4. Градиент температур ОКЭ со сплошным материалом – стеклопластиком при временном тепловом воздействии: а – 10 с; б – 600 с; в – 3600 с

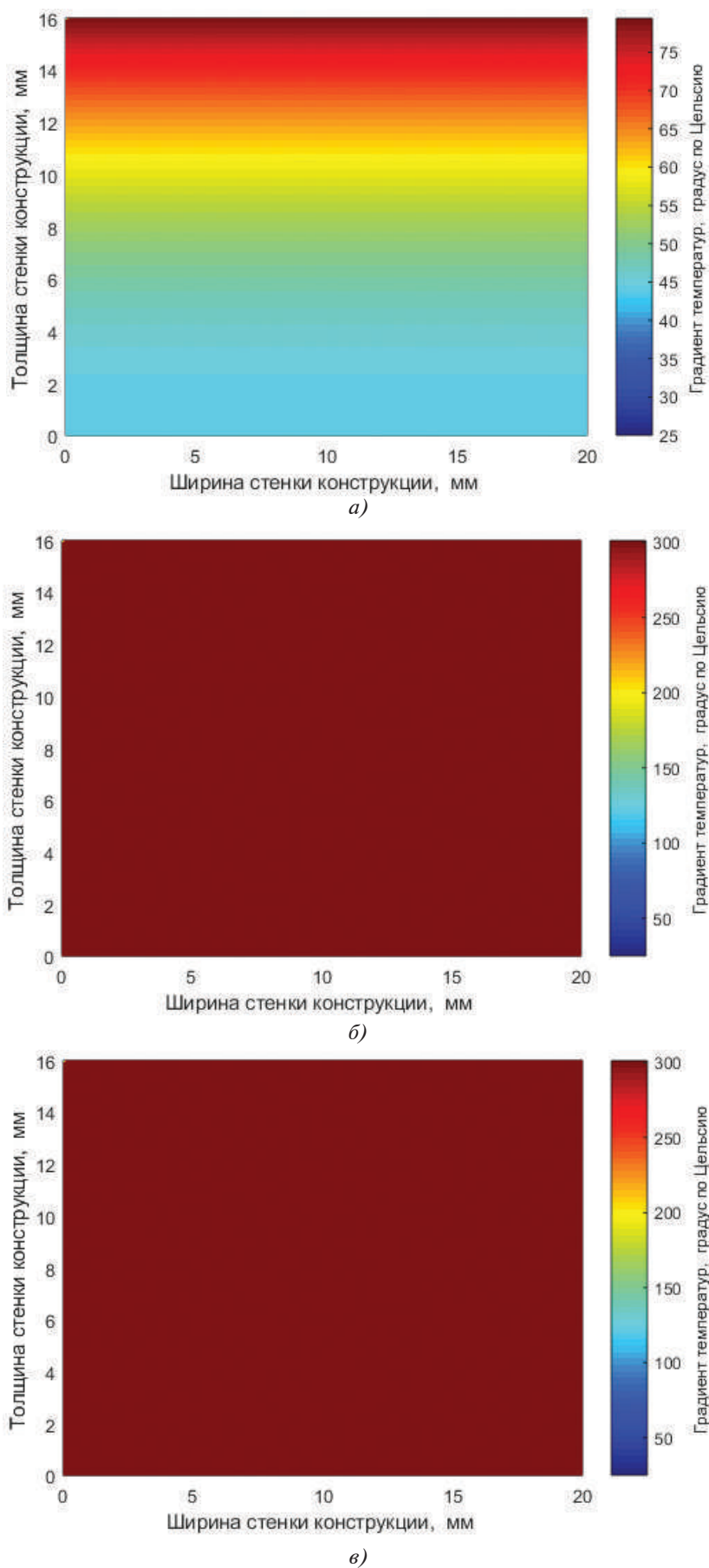


Рис. 5. Градиент температур ОКЭ со сплошным материалом – углепластиком при временном тепловом воздействии: а – 10 с; б – 600 с; в – 3600 с



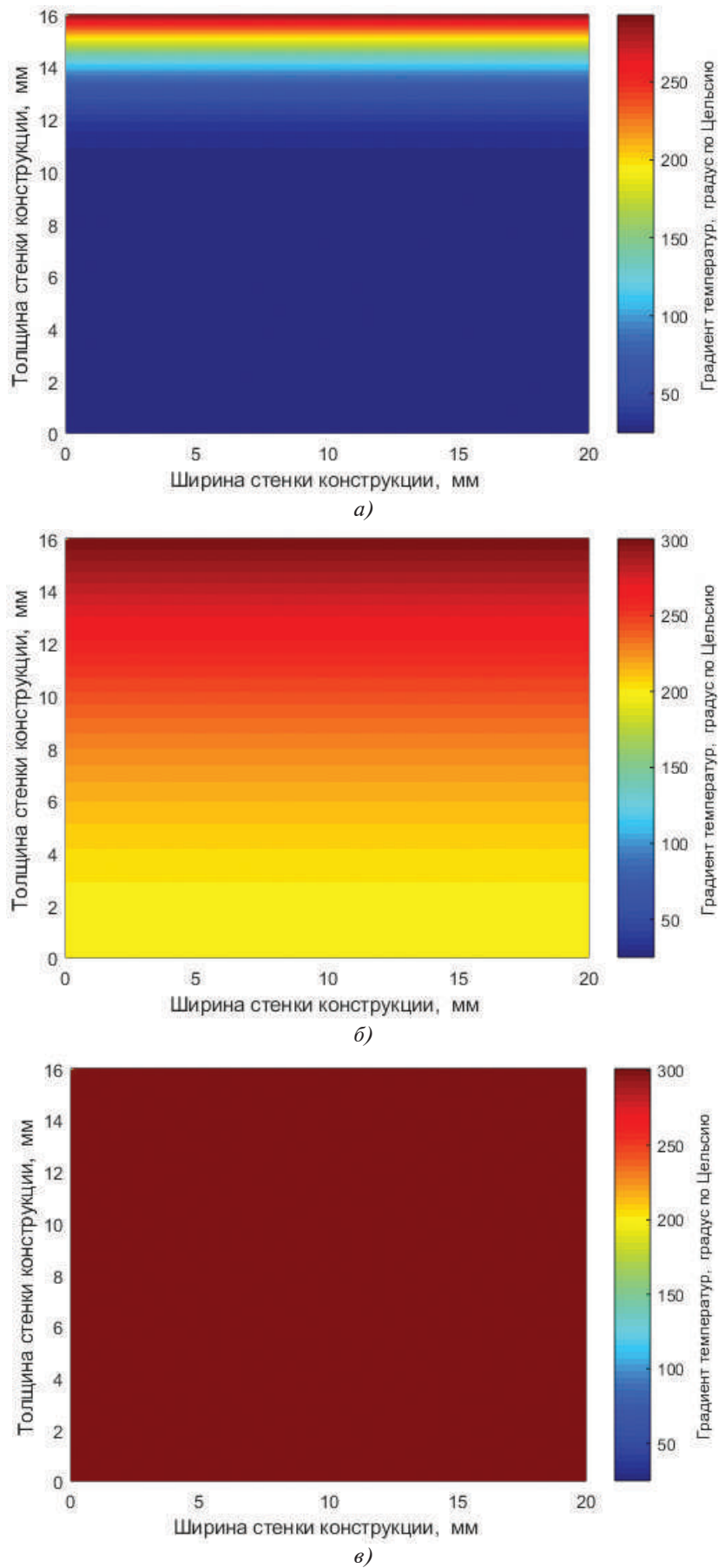


Рис. 6. Градиент температур ОКЭ со сплошным материалом – минеральной ватой на синтетическом связующем при временном тепловом воздействии: а – 10 с; б – 600 с; в – 3600 с

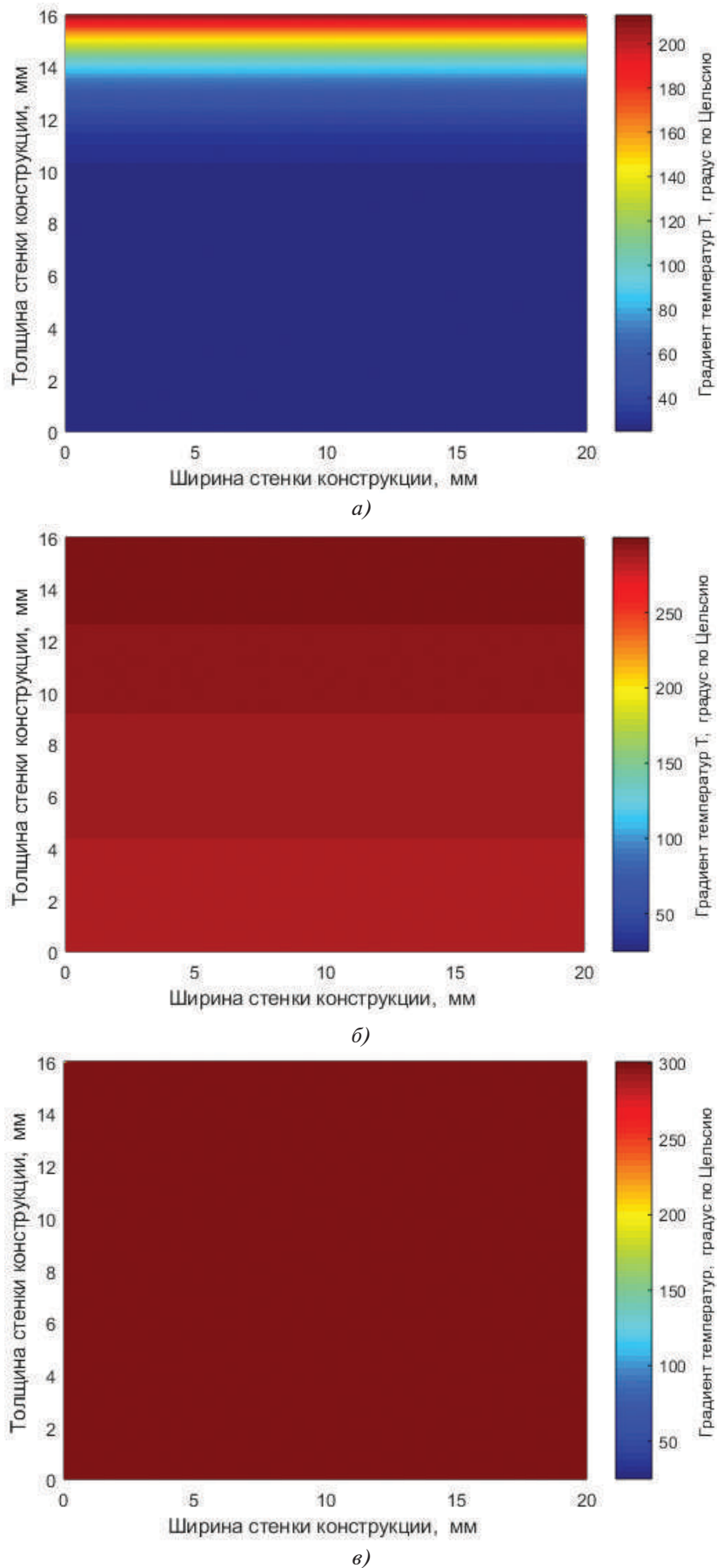


Рис. 7. Градиент температур ОКЭ с комбинацией стеклопластика и стеклянного штапельного волокна при временном тепловом воздействии: а — 10 с; б — 600 с; в — 3600 с

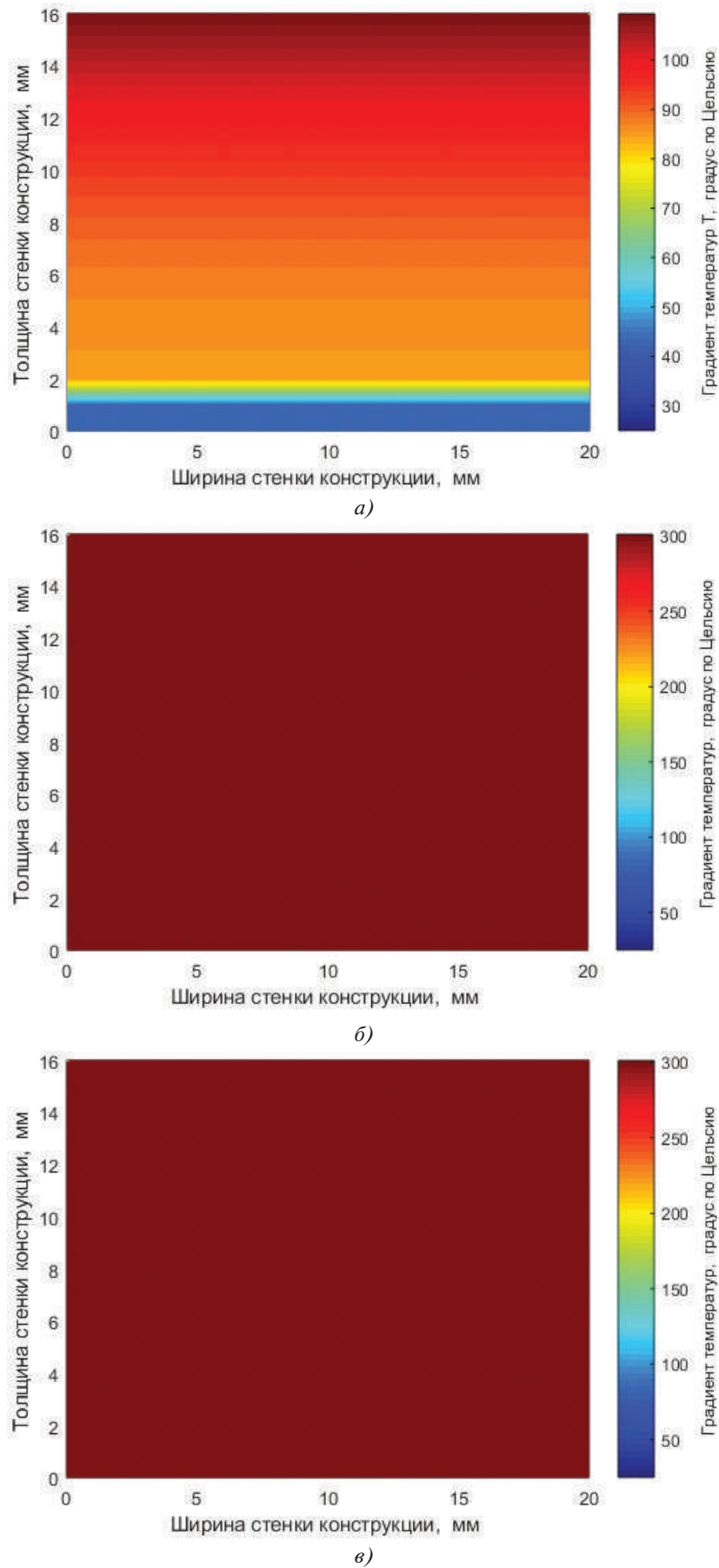


Рис. 8. Градиент температур ОКЭ с комбинацией углепластика и стеклянного штапельного волокна при временном тепловом воздействии: а – 10 с; б – 600 с; в – 3600 с

конструкции (см. рис. 1) для применения его в ЛА. Для описания эффективности применения многослойной конструкции были проведены численные исследования теплопроводности данной конструкции с существующими (см. рис. 2) материалами и конструкциями. Результаты численного исследования (см. табл. 2 и 3 и рис. 3–8) показали, что многослойная конструкция в 12 раз превосходит по теплоизоляции все другие аналоги, рассмотренные в работе. Эти результаты могут быть рекомендованы для использования в реальных конструкциях современных ЛА.

### Список источников

1. Шилкин О.В., Кишкин А.А., Зуев А.А., Делков А.В., Лавров Н.А. Проектирование системы пассивного охлаждения бортового комплекса космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 96–106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106
2. Бабашов В.Г., Варрик Н.М. Теплоизоляционные материалы для современных летательных аппаратов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 3(21). URL: <https://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/201.pdf>
3. 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 and Mass Transfer. 2019. Vol. 55, pp. 3427–3442. DOI: 10.1007/s00231-019-02668-0
4. 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. Vol. 55, pp. 3117–3131. DOI: 10.1007/s00231-019-02647-5
5. Букичев Ю.С., Богданова Л.М., Спиринов М.Г., Шершнев В.А., Шилов Г.В., Джардималиева Г.И. Композиционные материалы на основе эпоксидной матрицы и наночастиц диоксида титана (IV): получение, микроструктура и свойства // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 224–237. DOI: 10.34759/vst-2021-2-224-237
6. 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.
7. Прокофьев М.В., Журавлев С.Ю. Исследование влияния размера и формы нанодисперсных частиц графита на электрическую проводимость и термостойкость углеродных покрытий // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 2. С. 167–174.
8. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Николаева М.Ф. и др. Огнестойкий слоистый звукотеплоизолирующий материал. Патент RU 2465145 С1. Бюл. № 30, 27.10.2012.
9. Авиационные материалы: Справочник. В 12 т. Т. 9. Теплозащитные, теплоизоляционные и композиционные материалы, высокотемпературные неметаллические покрытия / Под общ. ред. Е.Н. Каблова. — М.: ВИАМ, 2011. С. 31.
10. Wierzbicki M., Miller K.B., Fernando J.A. Multi-layer fire protection material. Patent US20110126957A1, 02.06.2011.
11. Horrocks A., Anand S.C., Hill B.J. Fire and heat resistant materials Patent GB2279084A, 21.12.1994.
12. Shumate M.W., Stacy J.W. Reinforced Insulation Product and System Suitable for Use in an Aircraft. Patent US7278608B2, 09.10.2007.
13. Movsesian S., Patel J.D., Workman T., Deramo M.A. Modularized insulation, systems, apparatus, and methods. Patent US7083147B2, 01.08.2006.
14. Hosain Z., Borumand K., Sharma N. et al. Aircraft insulation systems and methods. Patent EP2236412B1, 31.03.2010.
15. ГОСТ 9573-2012. Плиты из минеральной ваты на синтетическом связующем теплоизоляционные. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2019. — 12 с.
16. ГОСТ 10499-95. Изделия теплоизоляционные из стеклянного штапельного волокна. Технические условия. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. — 12 с.
17. ГОСТ 20916-87. Плиты теплоизоляционные из пенопласта на основе резольных фенолоформальдегидных смол. Технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 1987. — 9 с.
18. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии: Учебное пособие. — СПб.: Профессия, 2008. — 560 с.
19. Пичулин В.С., Смирнова Г.А. Регулирование теплового состояния пилота маневренного самолета // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29441>
20. Лыков А.В. Теория теплопроводности: Учебное пособие. — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
21. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. — М.: Наука и техника, 1976. — 144 с.
22. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности: Учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2007. — 172 с.
23. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 785 с.
24. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов: Справочная книга. — Л.: Энергия, 1974. — 264 с.
25. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. — Л.: Энергоатомиздат, 1991. — 247 с.

## References

- Shilkin O.V., Kishkin A.A., Zuev A.A., Delkov A.V., Lavrov N.A. Passive cooling system designing for a spacecraft onboard complex. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 2, pp. 96-106. DOI: 10.34759/vst-2021-2-96-106
- Babashov V.G., Varrik N.M. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 3(21). URL: <https://materialsnews.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/201.pdf>
- 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 and Mass Transfer*, 2019, vol. 55, pp. 3427–3442. DOI: 10.1007/s00231-019-02668-0
- 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, vol. 55, pp. 3117-3131. DOI: 10.1007/s00231-019-02647-5
- Bukichev Y.S., Bogdanova L.M., Spirin M.G., Shershnev V.A., Shilov G.V., Dzhardimalieva G.I. Composite materials based on epoxy matrix and titanium dioxide (IV) nanoparticles: synthesis, microstructure and properties. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 2, pp. 224-237. DOI: 10.34759/vst-2021-2-224-237
- Maskaikin V.A., Makhrov V.P. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2021, vol. 13, no. 5, pp. 230-237.
- Prokof'ev M.V., Zhuravlev S.Y. The study of nano-dispersed graphite particles size and shape effect on electrical conductance and thermal resistance of carbonaceous coating. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 2, pp. 167-174.
- Sytyi Yu.V., Sagomonova V.A., Nikolaeva M.F. et al. *Patent RU 2465145 C1*, 27.10.2012.
- Aviatsionnye materialy: spravochnik v 12 t. T. 9. Teplozashchitnye, teploizolyatsionnye i kompozitsionnye materialy, vysokotemperaturnye nemetallicheskie pokrytiya* (Aviation materials: handbook in 12 vols. Vol. 9. Heat protection, thermal insulation and composite materials, high-temperature non-metallic coatings), Moscow, VIAM, 2011, p. 31.
- Wierzbicki M., Miller K.B., Fernando J.A. Multi-layer fire protection material. *Patent US20110126957A1*, 02.06.2011.
- Horrocks A., Anand S.C., Hill B.J. Fire and heat resistant materials. *Patent GB2279084A*, 21.12.1994.
- Shumate M.W., Stacy J.W. Reinforced Insulation Product and System Suitable for Use in an Aircraft. *Patent US7278608B2*, 09.10.2007.
- Movsesian S., Patel J.D., Workman T., Deramo M.A. Modularized insulation, systems, apparatus, and methods. *Patent US7083147B2*, 01.08.2006.
- Hosaaain Z., Borumand K., Sharma N. et al. Aircraft insulation systems and methods. *Patent EP2236412B1*, 31.03.2010.
- Plity iz mineral'noi vaty na sinteticheskom svyazuyushchem teploizolyatsionnye. Tekhnicheskie usloviya. GOST 9573-2012* (Thermal insulating plates of mineral wool on synthetic binder. Specifications. State Standard 9573-2012), Moscow, Standartinform, 2019, 12 p.
- Izdeliya teploizolyatsionnye iz steklyannogo shtapel'nogo volokna. Tekhnicheskie usloviya. GOST 10499-95* (Heat insulating products made of glass staple fiber. Specifications. State Standard 10499-95), Moscow, Standartinform, 1996, 12 p.
- 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, Standarty, 1987, 9 p.
- Kerber M.L. *Polimernye kompozitsionnye materialy. Struktura. Svoistva. Tekhnologii* (Polymer composite materials. Structure. Features. Technologies), St. Petersburg, Professiya, 2008, 560 p.
- Pichulin V.S., Smirnova G.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29441>
- Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* (Theory of thermal conductivity), Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 600 p.
- Berkovskii B.M., Nogotov E.F. *Raznostnye metody issledovaniya zadach teploobmena* (Difference methods for studying heat transfer problems), Moscow, Nauka i tekhnika, 1976, 144 p.
- Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* (Difference methods for solving heat conduction problems), Tomsk, TPU, 2007, 172 p.
- Samarskii A.A., Vabishchevich P.N. *Vychislitel'naya teploperedacha* (Computational heat transfer), Moscow, Editorial URSS, 2003, 785 p.
- Dul'nev G.N., Zarichnyak Yu.P. *Teploprovodnost' smesei i kompozitsionnykh materialov* (Thermal conductivity of mixtures and composite materials), Leningrad, Energiya, 1974, 264 p.
- Dul'nev G.N., Novikov V.V. *Protsessy perenosa v neodnorodnykh sredakh* (Transfer processes in heterogeneous environments), Leningrad, Energoatomizdat, 1991, 247 p.

Статья поступила в редакцию 27.09.2021; одобрена после рецензирования 20.10.2021; принята к публикации 20.10.2021.

The article was submitted on 27.09.2021; approved after reviewing on 20.10.2021; accepted for publication on 20.10.2021.