

Труды МАИ. 2025. № 143
Trudy MAI. 2025. No. 143. (In Russ.)

Научная статья

УДК 620.174

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185636>

EDN: <https://www.elibrary.ru/RIWSCC>

ДИНАМИЧЕСКИЙ НАГРЕВ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР

Антон Павлович Вятлев

ООО «Центр оптического стекла»,

Химки, Московская область, Россия

antonvyatlev@gmail.com

Аннотация. Работа посвящена исследованию динамического нагрева элементов терморегулирующих покрытий (далее – ТРП) под действием поля температур. Элементы ТРП класса «солнечный отражатель» монтируются на сотовые панели теплообменников космических аппаратов (далее – КА) и являются составными частями пассивной системы обеспечения теплового режима (далее – СОТР) КА. Элементы ТРП имеют многослойную структуру и представляют собой пластины с подложкой из прозрачного оптического радиационно-стойкого стекла (далее – ПОРС) с отражающим, защитным, и в некоторых случаях, при необходимости защиты поверхности КА и его приборов от статического электричества, электропроводным покрытиями. Основная задача элементов ТРП – обеспечение защиты КА от чрезмерного влияния электромагнитного Солнечного излучения (далее – ЭМИ), одновременного отвода избыточного тепла в окружающее космическое

пространство, поддержание необходимого теплового режима в определенном температурном диапазоне и при наличии электропроводного слоя и эквипотенциальной поверхности элемента ТРП – сброс статической энергии. Преимущественно работа ТРП осуществляется в безвоздушной среде, свободной от вещества – вакууме, вследствие чего, можно сделать вывод об отсутствии конвективного метода способа передачи тепловой энергии. Исходя из этого, основные способы осуществления терморегуляции достигаются благодаря применению ТРП с необходимыми характеристиками поглощения солнечного излучения A_s и коэффициентом излучения (черноты) внешних поверхностей КА и его составных частей. В данной работе проведен тепловой расчет образца элемента ТРП, температурное поведение которого смоделировано теплопроводящим трехслойным элементом. Решение проводится на основе преобразования Лапласа по времени с последующем обращении с помощью таблиц и вычислением интеграла свертки.

В результате проделанной работы представлена зависимость температурных полей исследуемого образца по времени в различных координатах, показаны температурные поля по толщине пакета в различные моменты времени, приведены распределения тепловых потоков по времени и координате, а также произведен сравнительный анализ с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ТРП, СОТР, терморегулирующие покрытия, солнечный отражатель, интегральное преобразования Лапласа, динамический нагрев

Для цитирования: Вятлев А.П. Динамический нагрев терморегулирующих покрытий под действием поля температур // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185636>

Original article

DYNAMIC HEATING OF THERMAL CONTROL COATINGS UNDER THE INFLUENCE OF A TEMPERATURE FIELD

Anton P. Viatlev

LLC «Center of optical glass»,

Khimki, Moscow region, Russia

antonvyatlev@gmail.com

Abstract. The work is devoted to the study of dynamic heating of elements of thermal control coatings (TCC) under the influence of a temperature field. Solar reflector class TCC elements are mounted on the honeycomb panels of spacecraft heat exchangers and are integral parts of the passive thermal management system. The TCC elements have a multilayer structure and are plates with a substrate of transparent optical radiation-resistant glass with reflective, protective, and in some cases if necessary to protect the surface of the spacecraft and its devices from static electricity, electrically conductive coatings. The main task of the TCC elements is to protect the spacecraft from the excessive influence of electromagnetic solar radiation, simultaneously dissipate excess heat into the surrounding space, maintain the necessary thermal regime in a certain temperature range and, in the presence of an electrically conductive layer and an equipotential surface of the TCC element, discharge static energy. The TCC mainly operates in an airless environment free of matter – a vacuum, as a result of which, it can be concluded that there is no convective method of heat energy transfer. Based on this, the main methods of thermoregulation are achieved through the use of TCC with the necessary characteristics of solar radiation absorption A_s and the radiation coefficient (blackness) of the outer surfaces of the spacecraft

and its components. In this paper, a thermal calculation of a sample of a TCC element is carried out, the temperature behavior of which is modeled by a thermally conductive three-layer element. The solution is based on the integral Laplace transform in time with subsequent reference using tables and properties of the Laplace transform and the convolution integral. As a result of the work done, the dependence of the temperature fields of the sample under study on time in various coordinates is presented, the temperature fields along the thickness of the package at various points in time are shown, the distribution of heat fluxes in time and coordinate is shown, and a comparative analysis with experimental data is performed.

Keywords: thermal control coating, TCC, thermal management system, spacecraft, solar reflector, Laplace transform, dynamic heating

For citation: Viatlev A.P. Dynamic heating of thermal control coatings under the influence of a temperature field. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185636>

1. Введение

В современном мире ракетно-космическая промышленность – одна из наиболее инновационных, высокотехнологичных и наукоемких отраслей. С каждым годом потребность в запусках космических аппаратов (далее – КА) только возрастает. Такие глобальные задачи, как освоение новых космических пространств, исследование соседних планет, увеличение спутниковых информационных систем детерминируют разработку космической аппаратуры как научной, так и военной. Этот факт ставит перед учеными всего мира новые исследовательские задачи, а для российской науки

еще более острые опережающих общие и мировые тенденции, способствующие не только научно-теоретическому познанию и практическому освоению Вселенной, но и интенсивной разработке и внедрению инновационных технологий и модернизированных спутниковых информационных систем, расширению их зоны космической телекоммуникации. Происходит быстрое переоснащение производства высокотехнологичным оборудованием, основанном на использовании последних научных достижений. Применяются новые материалы, позволяющие повысить точность и качество получаемых изделий.

В настоящее время успешно развиваются нано-технологии и общая миниатюризация промышленных изделий, в космической индустрии. Проектанты и конструктора летательных и космических аппаратов постоянно стремятся уменьшать размеры и вес служебной аппаратуры с целью увеличения массы полезной нагрузки, повышения качества и надежности космической техники. Появляются новые инженерные решения, элементная база, материалы. В космических аппаратах все в большем масштабе применяются приборы и узлы, содержащие хрупкие неметаллические материалы, такие как: оптические приборы, дисплеи, микроэлектронные сборки на основе сапфира, термооптические и терморегулирующие покрытия и многое другое. Особые условия эксплуатации этих изделий предъявляют повышенные требования к их качеству, что приводит к поиску и разработке новых решений, методов изготовления комплектующих и узлов КА, дооснащения и модернизации различных систем управления и жизнеобеспечения КА.

Одной из подобных является система, поддерживающая необходимый режим теплообмена бортовой аппаратуры и внешних поверхностей КА между собой, а также

с окружающим космическим пространством. Система тепловой защиты состоит из трех подсистем: активной, пассивной, комбинированной. Одна из составляющих пассивной системы [2, 3] это элементы терморегулирующего покрытия. Рассматриваемые в данной работе элементы устанавливаются на радиационные панели и теплообменники КА для обеспечения теплового регулирования путем отражения входящего солнечного излучения с одновременным отводом внутреннего тепла в окружающее пространство. Данный тип элементов относится к классу «солнечные отражатели» [4] и представляет собой прозрачные пластины из радиационно-стойкого стекла с последующим поочередным нанесением в вакууме отражающего и защитного слоев. При необходимости защиты КА от статического электричества, поверхность элемента ТРП требуется сделать эквипотенциальной на и в этих целях на противоположную сторону элемента наносится электропроводящий слой.

Актуальность рассматриваемой проблематики определила цель данной работы, которая заключается в исследовании температурных полей элементов терморегулирующих покрытий. При этом, принципиальным является определение поля температур внутри пакета терморегулирующие покрытия.

Основной задачей настоящей работы является изучение влияния терморегулирующих покрытий на прочностные характеристики подложки из оптического стекла с соблюдением необходимых норм светопропускания и электропроводности изделий путем изменения толщины наносимого покрытия, количества его слоев и состава самого материала. Для решения поставленной задачи определим поле температур для составного слоя.

2. Постановка задачи.

Представим терморегулирующие покрытие в виде теплопроводящего элемента, состоящего из трех слоев с толщинами $h_i (i=1..3)$, рисунок 1. На свободных поверхностях элемента действует постоянная температура T_a и T_g [7].

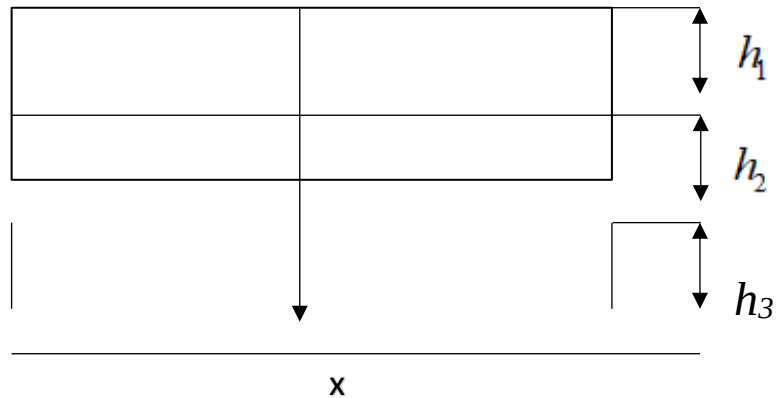


Рисунок 1. Терморегулирующие покрытие в виде теплопроводящего элемента, состоящего из трех слоев.

Пусть распределение тепловых потоков в слоях подчиняется классическому нестационарному уравнению теплопроводности:

$$\frac{\partial T_i(t, x)}{\partial t} - a_i^2 \nabla^2 T_i(t, x) = 0 \quad (1)$$

Тепловой поток будет иметь вид:

$$Q = -\hat{\lambda}_i \frac{\partial T_i(t, x)}{\partial x} \quad (2)$$

где $T(t, x)$ -температура, t, x -время и продольная координата соответственно,

∇^2 -оператор Лапласа, a_i^2 -коэффициенты температуропроводности материала, $\hat{\lambda}_i$ -коэффициенты теплопроводности

Приводим уравнения теплопроводности и тепловой поток безразмерному виду используя следующие величины:

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_1^2}{c_1} \tilde{x}; \quad t = \frac{a_1^2}{c_1^2} \tau; \\ T_1(t, x) &= \tilde{T}_1 T_0; \quad T_2(t, x) = \tilde{T} T_0; \quad T_3(t, x) = \tilde{T} T_0 \\ h_1 &= \tilde{h}_1 \frac{a_1^2}{c_1}; \quad h_2 = \tilde{h}_2 \frac{a_1^2}{c_1}; \quad h_3 = \tilde{h}_3 \frac{a_1^2}{c_1} \quad \lambda_1 = \frac{\hat{\lambda}_2}{\hat{\lambda}_1} \quad \lambda_2 = \frac{\hat{\lambda}_3}{\hat{\lambda}_2} \end{aligned} \quad (3)$$

Рассматривается теплопроводящий элемент, состоящий из трех слоев [6]. Предположим, что температурные поля в пакете зависят от времени и продольной координаты.

В безразмерных величинах уравнения теплопроводности примут вид:

$$\frac{\partial T_1(\tau, x)}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 T_1(\tau, x)}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_2(\tau, x)}{\partial \tau} - \alpha \frac{\partial^2 T_2(\tau, x)}{\partial x^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_3(\tau, x)}{\partial \tau} - \beta \frac{\partial^2 T_3(\tau, x)}{\partial x^2} = 0 \quad (6)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{a_2^2}{a_1^2}, \quad \beta = \frac{a_3^2}{a_1^2}$$

Начальные условия предполагаются однородными. Краевые условия будут иметь вид:

$$T_1(\tau, x)|_{x=0} = T_a \quad (7)$$

$$T_1(\tau, x)|_{x=h_1} = T_2(\tau, x)|_{x=h_1}, \quad (8)$$

$$\left. \frac{dT_1(\tau, x)}{dx} \right|_{x=h_1} = \lambda_1 \left. \frac{dT_2(\tau, x)}{dx} \right|_{x=h_1} \quad (9)$$

$$T_2(\tau, x)|_{x=h_1+h_2} = T_3(\tau, x)|_{x=h_1+h_2} \quad (10)$$

$$\left. \frac{dT_2(\tau, x)}{dx} \right|_{x=h_1+h_2} = \lambda_2 \left. \frac{dT_3(\tau, x)}{dx} \right|_{x=h_1+h_2} \quad (11)$$

$$T_3(\tau, x)|_{x=h_1+h_2+h_3} = T_b \quad (12)$$

Для решения поставленной задачи применим для системы уравнений (4-6) [8-24] и краевых условий (7-12) преобразование Лапласа по времени с параметром преобразования s , тогда получаем краевую задачу относительно трансформант:

$$sT_1^L(s, x) - \frac{d^2 T_1^L(s, x)}{dx^2} = 0 \quad (13)$$

$$sT_2^L(s, x) - \alpha \frac{d^2 T_2^L(s, x)}{dx^2} = 0 \quad (14)$$

$$sT_3^L(s, x) - \beta \frac{d^2 T_3^L(s, x)}{dx^2} = 0 \quad (15)$$

Краевые условия будут иметь вид:

$$T_1^L(x, s)|_{x=0} = \frac{T_a}{s} \quad (16)$$

$$T_1^L(x, s)|_{x=h_1} = T_2^L(x, s)|_{x=h_1} \quad (17)$$

$$\left. \frac{dT_1^L(x, s)}{dx} \right|_{x=h_1} = \lambda_1 \left. \frac{dT_2^L(x, s)}{dx} \right|_{x=h_1} \quad (18)$$

$$T_2^L(x, s)|_{x=h_1+h_2} = T_3^L(x, s)|_{x=h_1+h_2} \quad (19)$$

$$\left. \frac{dT_2^L(x, s)}{dx} \right|_{x=h_1+h_2} = \lambda_2 \left. \frac{dT_3^L(x, s)}{dx} \right|_{x=h_1+h_2} \quad (20)$$

$$T_3^L(x, s) \Big|_{x=h_1+h_2+h_3} = \frac{T_b}{s} \quad (21)$$

Решение системы уравнений (4-6) имеет вид:

$$\begin{aligned} T_1^L(s, x) &= C_{11} e^{x\sqrt{s}} + C_{21} e^{-x\sqrt{s}} \\ T_2^L(s, x) &= C_{21} e^{x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} + C_{22} e^{-x\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} \\ T_3^L(s, x) &= C_{31} e^{x\sqrt{\frac{s}{\beta}}} + C_{32} e^{-x\sqrt{\frac{s}{\beta}}} \end{aligned} \quad (22)$$

Подставляя решение уравнений (4-6) в краевые условия (16-21) получаем алгебраическую систему уравнений относительно констант интегрирования системы уравнений (22):

$$\left\{ \begin{aligned} C_{11} + C_{12} &= \frac{T_a}{s} \\ C_{31} e^{c\sqrt{\frac{s}{\beta}}} + C_{32} e^{-c\sqrt{\frac{s}{\beta}}} &= \frac{T_b}{s} \\ C_{11} e^{a\sqrt{s}} + C_{12} e^{-a\sqrt{s}} &= C_{21} e^{a\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} + C_{22} e^{-a\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} \\ \sqrt{s}(C_{11} e^{a\sqrt{s}} - C_{12} e^{-a\sqrt{s}}) &= \lambda_1 \sqrt{\frac{s}{\alpha}} (C_{21} e^{a\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} - C_{22} e^{-a\sqrt{\frac{s}{\alpha}}}) \\ C_{21} e^{b\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} + C_{22} e^{-b\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} &= C_{31} e^{b\sqrt{\frac{s}{\beta}}} + C_{32} e^{-b\sqrt{\frac{s}{\beta}}} \\ \sqrt{\frac{s}{\alpha}} (C_{21} e^{b\sqrt{\frac{s}{\alpha}}} - C_{22} e^{-b\sqrt{\frac{s}{\alpha}}}) &= \lambda_2 \sqrt{\frac{s}{\beta}} (C_{31} e^{b\sqrt{\frac{s}{\beta}}} - C_{32} e^{-b\sqrt{\frac{s}{\beta}}}) \end{aligned} \right. \quad (23)$$

Здесь $a = h_1$, $b = h_1 + h_2$, $c = h_1 + h_2 + h_3$.

Решая систему уравнений (23), получаем:

$$C_{11} = \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^1 \sqrt{s}} + T_b \gamma^1 e^{-\beta^2 \sqrt{s}}}{sQ \left[1 + f(\sqrt{s}) \right]} \quad (24)$$

$$C_{12} = \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^3 \sqrt{s}} + T_b \gamma^1 e^{-\beta^4 \sqrt{s}}}{sQ \left[1 + f(\sqrt{s}) \right]} \quad (25)$$

$$C_{21} = \sqrt{\alpha} \frac{T_a \sum_{i=1}^2 \alpha_i^2 e^{-\beta_i^5 \sqrt{s}} + T_b \sum_{i=1}^2 \gamma_i^2 e^{-\beta_i^6 \sqrt{s}}}{sV \left[1 + f(\sqrt{s}) \right]} \quad (26)$$

$$C_{22} = \sqrt{\alpha} \frac{T_a \sum_{i=1}^2 \alpha_i^2 e^{-\beta_i^7 \sqrt{s}} + T_b \sum_{i=1}^2 \gamma_i^2 e^{-\beta_i^8 \sqrt{s}}}{sV \left[1 + f(\sqrt{s}) \right]} \quad (27)$$

$$C_{31} = - \frac{T_a \alpha^3 e^{-\beta^9 \sqrt{s}} + T_b \sum_{i=1}^4 \gamma_i^3 e^{-\beta_i^{10} \sqrt{s}}}{s\sqrt{\beta}Q \left[1 + f(\sqrt{s}) \right]} \quad (28)$$

$$C_{32} = \frac{T_a \alpha^3 e^{-\beta^{11} \sqrt{s}} + T_b \sum_{i=1}^4 \gamma_i^4 e^{-\beta_i^{12} \sqrt{s}}}{s\sqrt{\beta}Q \left[1 + f(\sqrt{s}) \right]} \quad (29)$$

В этих выражениях:

$$f(\sqrt{s}) = \sum_{\kappa=1}^7 \alpha_{\kappa} e^{-\beta_{\kappa} \sqrt{s}}$$

$$\text{где } \alpha_1 = \lambda_1 \lambda_2 \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} + \sqrt{\alpha} - \frac{\alpha \lambda_2}{\sqrt{\beta}} - \lambda_1 \quad \beta_1 = 2 \left(a + \frac{c-b}{\sqrt{\beta}} \right)$$

Тогда трансформанты поля температур в (22) будут иметь вид:

$$T_1^L(s, x) = \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^1 \sqrt{s}} + T_b \gamma^1 e^{-\beta^2 \sqrt{s}}}{sQ[1 + f(\sqrt{s})]} e^{x\sqrt{s}} + \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^3 \sqrt{s}} + T_b \gamma^1 e^{-\beta_i^4 \sqrt{s}}}{sQ[1 + f(\sqrt{s})]} e^{-x\sqrt{s}} =$$

$$= \frac{1}{sQ} \left\{ T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 \left[e^{-(\beta_i^1 - x)\sqrt{s}} + e^{-(\beta_i^2 + x)\sqrt{s}} \right] + T_b \gamma^1 \left[e^{-(\beta_i^3 + x)\sqrt{s}} + e^{-(\beta_i^4 + x)\sqrt{s}} \right] \right\} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n f(\sqrt{s})^n \quad (30)$$

$$T_2^L(s, x) = \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^1 \sqrt{s}} + T_b \gamma_i^2 e^{-\beta_i^6 \sqrt{s}}}{sQ[1 + f(\sqrt{s})]} e^{x\sqrt{s}} + \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^2 \sqrt{s}} + T_b \gamma_i^2 e^{-\beta_i^8 \sqrt{s}}}{sQ[1 + f(\sqrt{s})]} e^{-x\sqrt{s}} =$$

$$= \frac{1}{sQ} \left\{ T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 \left[e^{-(\beta_i^1 - x)\sqrt{s}} + e^{-(\beta_i^2 + x)\sqrt{s}} \right] + T_b \gamma_i^2 \left[e^{-(\beta_i^6 - x)\sqrt{s}} + e^{-(\beta_i^8 + x)\sqrt{s}} \right] \right\} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n f(\sqrt{s})^n \quad (31)$$

$$T_3^L(s, x) = \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^1 \sqrt{s}} + T_b \gamma_i^3 e^{-\beta_i^{10} \sqrt{s}}}{sQ[1 + f(\sqrt{s})]} e^{x\sqrt{s}} + \frac{T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 e^{-\beta_i^2 \sqrt{s}} + T_b \gamma_i^4 e^{-\beta_i^{12} \sqrt{s}}}{sQ[1 + f(\sqrt{s})]} e^{-x\sqrt{s}} =$$

$$= \frac{1}{sQ} \left\{ T_a \sum_{i=1}^4 \alpha_i^1 \left[e^{-(\beta_i^1 - x)\sqrt{s}} + e^{-(\beta_i^2 + x)\sqrt{s}} \right] + T_b \gamma \left[e^{-(\beta_i^{10} - x)\sqrt{s}} + e^{-(\beta_i^{12} + x)\sqrt{s}} \right] \right\} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n f(\sqrt{s})^n \quad (32)$$

Анализируя трансформанты (30-32) можно сделать вывод, что все без исключения слагаемые представляют собой выражения кратные $\frac{e^{-\alpha\sqrt{s}}}{s}$, оригиналы которого находятся достаточно просто с помощью свойств преобразования Лапласа и соответствующих таблиц [1]:

$$\frac{e^{-\alpha\sqrt{s}}}{s} \xrightarrow{L} \operatorname{erfc} \frac{\alpha}{2\sqrt{t}} \quad (33)$$

3. Результаты расчетов

1. На рисунке 2 представлены зависимости температурных полей пакета по времени в различных координатах.

2. Рисунок 3 показывает температурные поля по толщине пакета в различные моменты времени.

3. На Рисунках 4-5 приводятся распределения тепловых потоков по времени и координате.

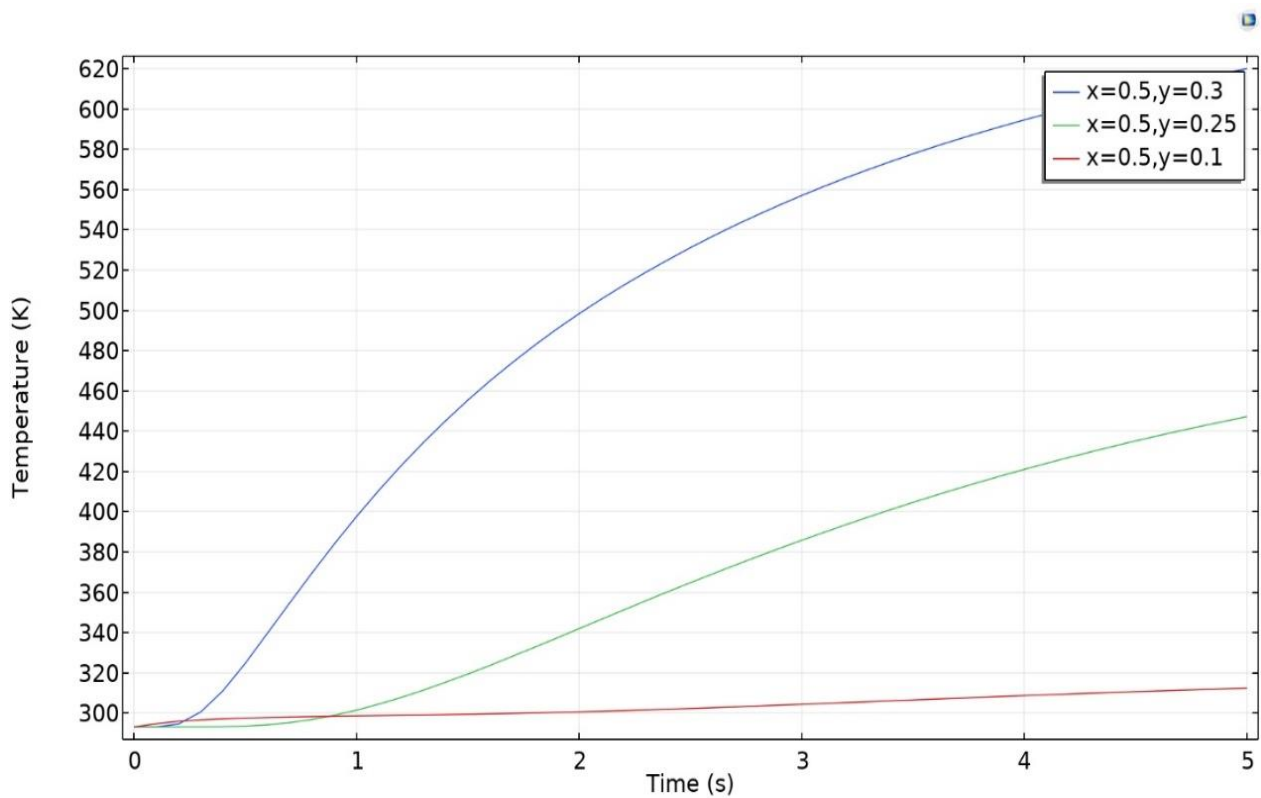


Рисунок 2. Зависимости температурных полей пакета по времени в различных координатах

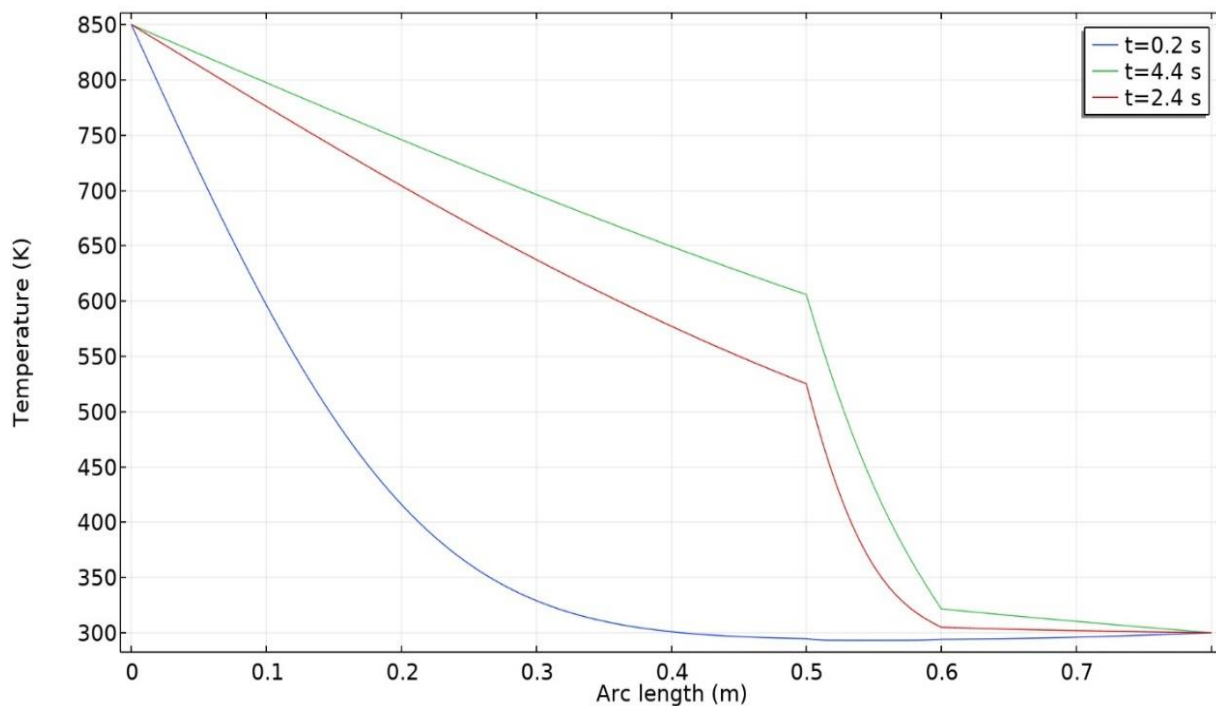


Рисунок 3. температурные поля по толщине пакета в различные моменты времени.

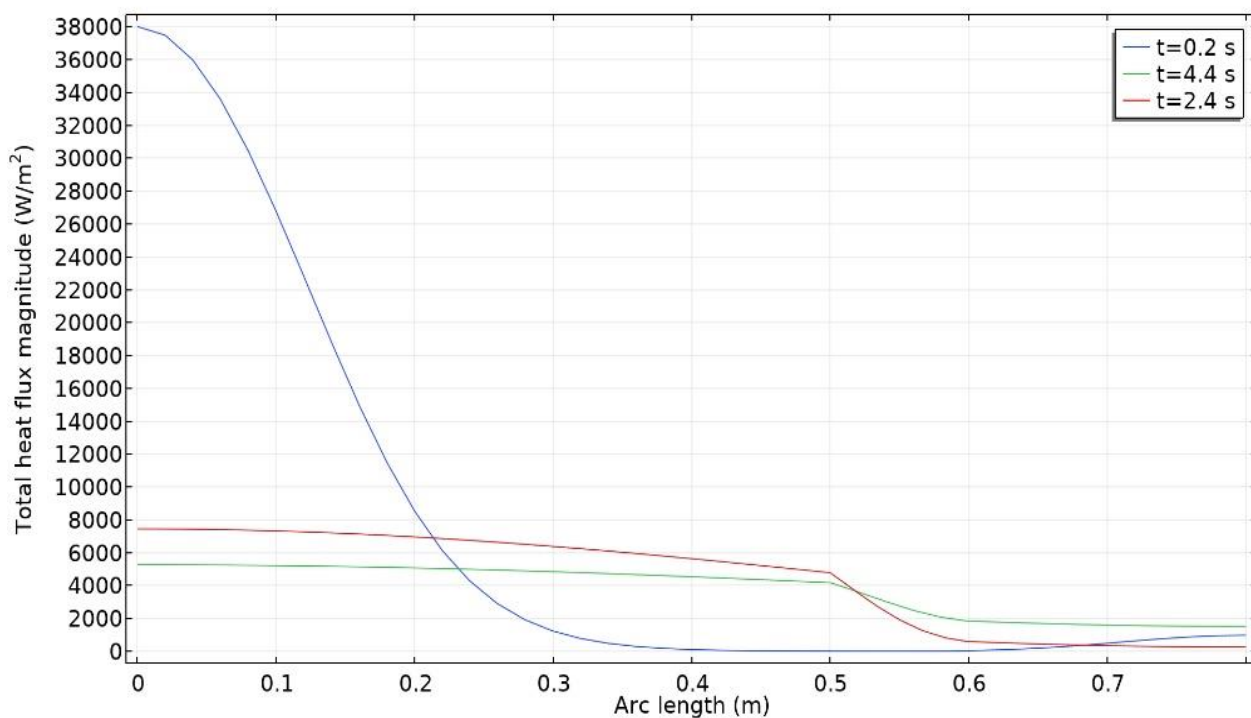


Рисунок 4. Распределение тепловых потоков по времени и координате.

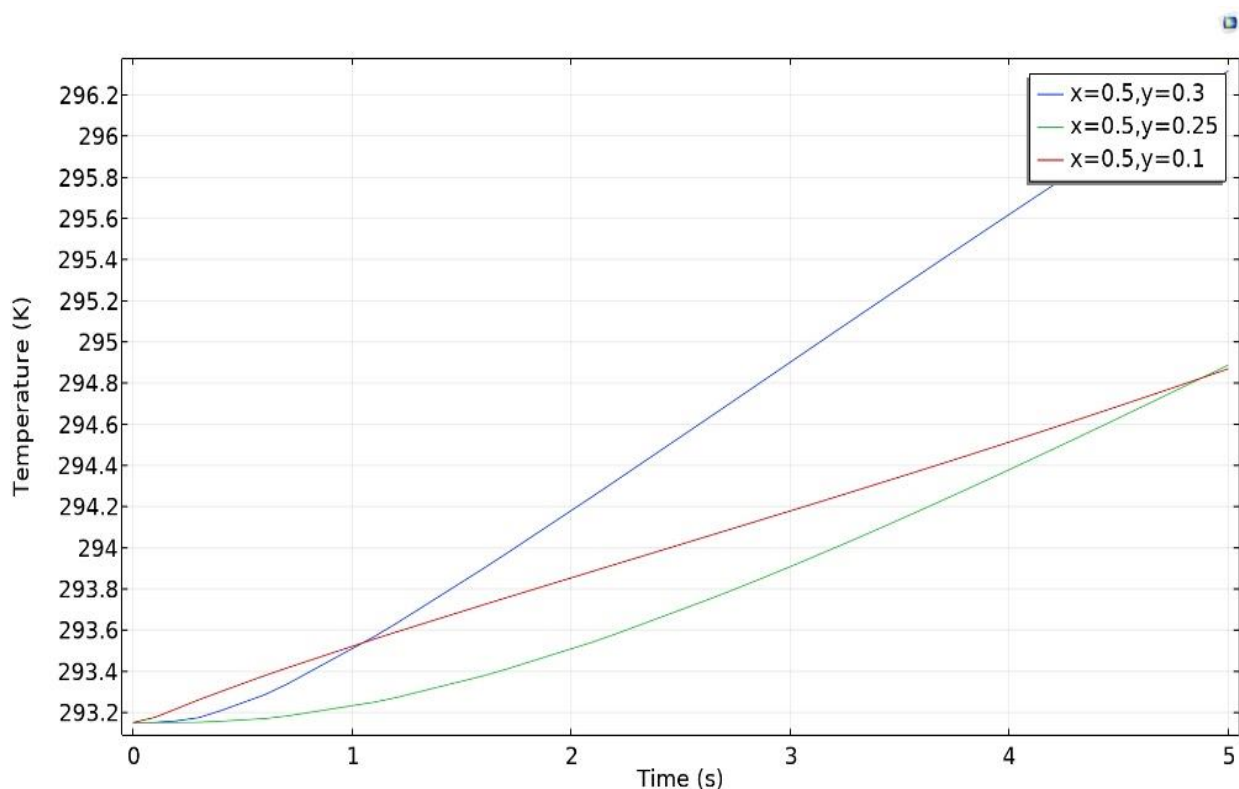


Рисунок 5. Распределение тепловых потоков по времени и координате.

4. Выводы

С учетом проведенных экспериментальных исследований построена математическая модель, позволяющая определить поле температур от произвольных поверхностных источников тепла. Решение основано на использовании классического уравнения теплопроводности. Исследуемые элементы ТРП представляют собой многослойные элементы с подложкой из прозрачного оптического радиационно-стойкого стекла с отражающим, защитным покрытиями, температурное поведение которых моделируется теплопроводящим трехслойным элементом. Решение проводится на основе интегрального преобразования Лапласа по времени с последующим обращением с помощью таблиц и свойств преобразования

Лапласа и интеграла свертки. Расчеты показывают (рис 2-5) адекватные результаты и удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Список источников

1. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М.: Высшая школа, 1965. – 466 с.
2. Kevin A.J. Doherty, Barry Twomey, Sinéad McGlynn et al. HighTemperature Solar Reflector Coating for the Solar Orbiter // Journal of Spacecraft and Rockets. 2016. Vol. 53, No. 6. P. 1077-1084. DOI: [10.2514/1.A33561](https://doi.org/10.2514/1.A33561)
3. Атамасов В.Д., Ермолаев В.И., Кукушкин И.О. Система обеспечения теплового режима космического аппарата. - Санкт-Петербург: Министерство обороны РФ, 2003. - 71 с.
4. Герасимов С.А. Рассеяние молекул неоднородной поверхностью твердого тела: метод и особенности моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2011. № 2. С. 62-67.
5. Вятлев П.А., Гончаров К.А., Сигаев В.Н., Сысоев В.К., Юдин А.Д. Анализ технологии изготовления стеклянных элементов для термооптических покрытий космических элементов // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98751>
6. Бабайцев А.В., Бурцев А.Ю., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Методика приближенной оценки напряжений в толстостенной осесимметричной композитной

конструкции // Труды МАИ. 2019. № 107. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=107879>

7. Терещенко Т.С. Динамический нагрев полуплоскости подвижным источником излучения с учетом теплоотдачи на поверхности // Труды МАИ. 2024. № 139. URL:
<https://trudymai.ru/published.php?ID=183448>

8. Щавелев О.С., Щавелев К.О., Якобсон Н.А. Термостойкость и механическая прочность стекол // Оптический журнал. 2001. Т. 68, № 11. С. 52-57.

9. Otto Peter. Fuzzy modelling of nonlinear dynamic system by inductive learned rules // Радиоэлектроника и информатика 1997. № 1. Р. 67-70.

10. Егорова О.В., Жаворонок С.И., Курбатов А.С. О приложении различных вариантов теории оболочек N-го порядка к некоторым задачам о прогрессивных волнах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. № 11. Ч. 1. С. 255-266.

11. Вестяк В.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В. Математические основы термоупругости: учебное пособие. - М.: МАИ, 2021. - 92 с.

12. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В., Федотенков Г.В. Термоупругость. Одномерные нестационарные задачи: учебное пособие. - М.: МАИ, 2023. - 95 с.

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

14. Steuben J.C., Iliopoulos A.P., Michopoulos J.G. Discrete Element Modeling of Particle-Based Additive Manufacturing Processes // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2016. No. 305. P. 537–561. DOI: [10.1016/j.cma.2016.02.023](https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.02.023)

15. Bai X., Zhang H., Wang G. Improving prediction accuracy of thermal analysis for weld-based additive manufacturing by calibrating input parameters using IR imaging //

International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. No. 69. P. 5-8. DOI: [10.1007/s00170-013-5102-y](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5102-y)

16. Megahed M., Mindt H.-W., N'Dri N., Duan H., Desmaison O. Metal additive manufacturing process and residual stress modeling // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 2016. No. 5. DOI: [10.1186/s40192-016-0047-2](https://doi.org/10.1186/s40192-016-0047-2)

17. Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones // Acta Materialia. 2016. No. 108. P. 36–45. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.02.014](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.014)

18. Li C., Liu J.F., Guo Y.B. Efficient Multiscale Prediction of Cantilever Distortion by Selective Laser Melting // Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. 2016. P. 236-246.

19. Zaeh M.F., Branner G. Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting // Production Engineering. 2010. No. 4. DOI: [10.1007/s11740-009-0192-y](https://doi.org/10.1007/s11740-009-0192-y)

20. Shen F., Yuan S., Chua C.K., Zhou K. Development of process efficiency maps for selective laser sintering of polymeric composite powders: Modeling and experimental testing // Journal of Materials Processing Technology. 2018. No. 254. P. 52–59. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2017.11.027](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.027)

21. Green A.E., Naghdi P.M. A re-examination of the basic postulates of thermomechanics // Proceedings of the Royal Society A. 1991. Vol. 432, P. 171- 194. DOI: [10.1098/rspa.1991.0012P](https://doi.org/10.1098/rspa.1991.0012P). 171-194

22. Green A.E., Naghdi P.M. Thermoelasticity without energy dissipation // Journal Elasticity. 1993. P. 189-208. DOI: [10.1007/BF00044969](https://doi.org/10.1007/BF00044969)
23. Green A.E., Naghdi P.M. On undamped heat waves in an elastic solid // Journal Thermal Stresses. 1992. Vol. 15, No. 2. P. 253-264. DOI: [10.1080/01495739208946136](https://doi.org/10.1080/01495739208946136)
24. Огибалов П.М., Грибанов В.Ф. Термоустойчивость пластин и оболочек. - М.: МГУ, 1968. – 520 с.

References

1. Ditkin V.A., Prudnikov A.P. *Spravochnik po operatsionnomu ischisleniyu* (Guide of operational calculus. Textbook.). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1965. 466 p.
2. Kevin A.J. Doherty, Barry Twomey, Sinéad McGlynn et al. HighTemperature Solar Reflector Coating for the Solar Orbiter. *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2016. Vol. 53, No. 6. P. 1077-1084. DOI: [10.2514/1.A33561](https://doi.org/10.2514/1.A33561)
3. Atamasov V.D., Ermolaev V.I., Kukushkin I.O. *Sistema obespecheniya teplovogo rezhima kosmicheskogo apparata* (The system of ensuring the thermal regime of the spacecraft). Saint-Petersburg: Ministerstvo oborony RF Publ., 2003. 71 p.
4. Gerasimov C.A. Scattering of molecules by an inhomogeneous solid surface: method and features of modeling. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2011. No. 2. P. 62-67. (In Russ.)
5. Vyatlev P.A., Goncharov K.A., Sigaev V.N., Sysoev V.K., Yudin A.D. Glass elements fabrication technology analysis for space elements thermo-optical covering. *Trudy MAI*. 2018. No. 102. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98751>

6. Babaitsev A.V., Burtsev A.YU., Rabinskii L.N., Solyaev YU.O. A technique for approximate stresses evaluation in a thick-wall composite axisymmetric structure. *Trudy MAI*. 2019. No. 107. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107879>
7. Tereshchenko T.S. Dynamic heating of a half-plane with a mobile laser radiation source considering heat transfer on the surface. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183448>
8. Shchavelev O.S., Shchavelev K.O., Yakobson N.A. Heat resistance and mechanical strength of glasses. *Opticheskii zhurnal*. 2001. Vol. 68, No. 11. P. 52-57. (In Russ.)
9. Otto Peter. Fuzzy modelling of nonlinear dynamic system by inductive learned rules. *Radioelektronika i informatika*. Charkov. 1997. No. 1. P. 67-70.
10. Egorova O.V., Zhavoronok S.I., Kurbatov A.S. On the application of various versions of the theory of N-th order shells to some problems of progressive waves. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2014. Vol. 1, No. 11. P. 255-266. (In Russ.).
11. Vestyak V.A., Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. *Matematicheskie osnovy termouprugosti* (Mathematical foundations of thermoelasticity). Moscow: MAI Publ., 2021. 92 p.
12. Zemskov A.V., Tarlakovskii D.V., Fedotenkov G.V. *Termouprugost'. Odnomernye nestatsionarnye zadachi: Thermoelasticity* (Thermoelasticity. One-dimensional unsteady tasks). Moscow: MAI Publ., 2023. 95 p.
13. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* (Theory of thermal conductivity). Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p.

14. Steuben J.C., Iliopoulos A.P., Michopoulos J.G. Discrete Element Modeling of Particle-Based Additive Manufacturing Processes. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2016. No. 305. P. 537–561. DOI: [10.1016/j.cma.2016.02.023](https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.02.023)
15. Bai X., Zhang H., Wang G. Improving prediction accuracy of thermal analysis for weld-based additive manufacturing by calibrating input parameters using IR imaging. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. No. 69. P. 5-8. DOI: [10.1007/s00170-013-5102-y](https://doi.org/10.1007/s00170-013-5102-y)
16. Megahed M., Mindt H.-W., N'Dri N., Duan H., Desmaison O. Metal additive manufacturing process and residual stress modeling. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*. 2016. No. 5. DOI: [10.1186/s40192-016-0047-2](https://doi.org/10.1186/s40192-016-0047-2)
17. Khairallah S.A., Anderson A.T., Rubenchik A., King W.E. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*. 2016. No. 108. P. 36–45. DOI: [10.1016/j.actamat.2016.02.014](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.02.014)
18. Li C., Liu J.F., Guo Y.B. Efficient Multiscale Prediction of Cantilever Distortion by Selective Laser Melting. *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. 2016. P. 236-246.
19. Zaeh M.F., Branner G. Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting. *Production Engineering*. 2010. No. 4. DOI: [10.1007/s11740-009-0192-y](https://doi.org/10.1007/s11740-009-0192-y)
20. Shen F., Yuan S., Chua C.K., Zhou K. Development of process efficiency maps for selective laser sintering of polymeric composite powders: Modeling and experimental

testing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. No. 254. P. 52–59. DOI: [10.1016/j.jmatprotec.2017.11.027](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.027)

21. Green A.E., Naghdi P.M. A re-examination of the basic postulates of thermomechanics. *Proceedings of the Royal Society A*. 1991. Vol. 432, P. 171- 194. DOI: [10.1098/rspa.1991.0012P. 171-194](https://doi.org/10.1098/rspa.1991.0012P.171-194)

22. Green A.E., Naghdi P.M. Thermoelasticity without energy dissipation. *Journal Elasticity*. 1993. P. 189-208. DOI: [10.1007/BF00044969](https://doi.org/10.1007/BF00044969)

23. Green A.E., Naghdi P.M. On undamped heat waves in an elastic solid. *Journal Thermal Stresses*. 1992. Vol. 15, No. 2. P. 253-264. DOI: [10.1080/01495739208946136](https://doi.org/10.1080/01495739208946136)

24. Ogibalov P.M., Gribanov V.F. *Termoustoichivost' plastin i obolochek* (Thermal stability of plates and shells). Moscow: MGU Publ., 1968. 520 p.

Статья поступила в редакцию 09.06.2025

Одобрена после рецензирования 16.06.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 09.06.2025; approved after reviewing on 16.06.2025; accepted for publication on 25.08.2025