

УДК 621.396.6+536.24

kuan06@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАБОТЕ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ****PROVIDING THERMAL REGIME WHEN OPERATING  
TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT***Барбин Н. М.<sup>1,2</sup>, доктор технических наук, профессор,**Бородин А. А.<sup>1</sup>, кандидат технических наук,**Куанышев В. Т.<sup>2</sup>, кандидат физико-математических наук, доцент,**Санников А. А.<sup>2</sup>,**Шнайдер А. В.<sup>1</sup>, кандидат технических наук, доцент,**<sup>1</sup>Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург,**<sup>2</sup>Уральский технический институт связи и информатики, Екатеринбург,**Barbin N.<sup>1,2</sup>, Borodin A.<sup>1</sup>, Kuanishev V.<sup>2</sup>, Sannikov A.<sup>2</sup>, Schneider A.<sup>1</sup>,**<sup>1</sup>Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Yekaterinburg,**<sup>2</sup>Ural Technical Institute of Communications and Informatics, Yekaterinburg*

Исследуется влияние тепловых процессов на работу телекоммуникационного оборудования, определяющих надежную работу аппаратуры. Математическое и компьютерное моделирование тепловых процессов в отдельных элементах оборудования проводится на основе нестационарного уравнения теплопроводности.

*Ключевые слова:* тепловое поле, уравнение теплопроводности, математическое моделирование, метод конечных разностей.

The influence of thermal processes on the operation of telecommunication equipment, which determine the reliable operation of the equipment, is investigated. Mathematical and computer modeling of thermal processes in individual elements of equipment is carried out on the basis of a non-stationary heat conduction equation.

*Keywords:* thermal field, heat equation, mathematical modeling, finite difference method.

**Введение**

В работе исследуются процессы, определяющие тепловой режим устройств и отдельных элементов телекоммуникационного оборудования [1;2]. Температурный режим, связанный с отводом теплоты от радиоэлектронных устройств в замкнутом объеме, является основным фактором, отвечающим за надежность функционирования устройств и систем [3]. Следовательно, знание распределения температуры по данному компоненту конструкции (например, на плате с установленными на ней радиокомпонентами) может дать информацию о выполнении оптимального теплового режима.

**Постановка задачи**

Проведение эксперимента для исследования теплового режима телекоммуникационного оборудования. Создание математической модели распространения теплового потока для отдельных узлов оборудования (платы с установленными радиокомпонентами), а также проведение компьютерного моделирования и визуализации температурного поля по данным вычислительного эксперимента.

**Проведение эксперимента для исследования теплового режима**

Основная задача эксперимента – анализ воздействия теплового потока на телекоммуникационное оборудование, электронные платы и установленные в ней элементы. Также рассмотрены более нагретые зоны в оборудовании.

Для проведения эксперимента было выбрано несколько объектов телекоммуникационного оборудования. В качестве средства исследования температурных полей использовался тепловизор FLIR-T335. Для визуализации результатов эксперимента и наглядного представления изображе-

ний, полученных по тепловизору, они обрабатывались в графическом редакторе Flir Tools.

На рис. 1 и 2 приведены распределения и показания температуры объекта – стойка телекоммуникационного оборудования.



Рисунок 1. Телекоммуникационная стойка с радиоэлектронным оборудованием



Рисунок 2. Температурное состояние телекоммуникационной стойки с большим потреблением мощности

Из рис. 2 видно превышение температуры по сравнению с рис. 1. Существенно увеличилась тепловая нагрузка на элементы аппаратуры, что связано с большим потреблением мощности.

В качестве другого объекта исследования использовалась электронная плата измерительного устройства. На рис. 3 хорошо видно нагретое состояние отдельных элементов и узлов электронной платы



Рисунок 3. Плата с отдельными теплонагруженными электронными компонентами

Отметим следующие факторы, способствующие оптимизации теплового режима отдельных элементов и узлов электронной платы:

- Элементы, подверженные тепловой нагрузке, необходимо располагать на определенном расстоянии от нагретых зон.

- В некоторых случаях следует использовать системы отведения тепла либо применять способы принудительного охлаждения направленным потоком холодного воздуха.

- Некоторые элементы плат, которые расположены в области сильного нагрева, следует изготавливать из теплоустойчивых материалов.

#### Методика расчетов

Чтобы провести исследования теплового воздействия на отдельные элементы следует решить двумерную задачу

теплопроводности для неоднородного тела. В качестве модельной задачи рассмотрим процесс теплопереноса в пластине (модель электронной платы), на которой расположены элементы, то есть имеются включения (рис. 4). Число включений выберем равным четырем. Для большего числа элементов возрастает объем вычислений и растет размер кода программы, но принципиально на выводы и физические явления это не влияет.

Размеры  $l_1, l_2, l_3, l_4, h_1, h_2, h_3, h_4$  выбираются так, чтобы разностная сетка была равномерной. Для этого в программе для входных параметров будут задаваться не линейные размеры, а количество промежутков, характеризующих рассматриваемый отрезок.

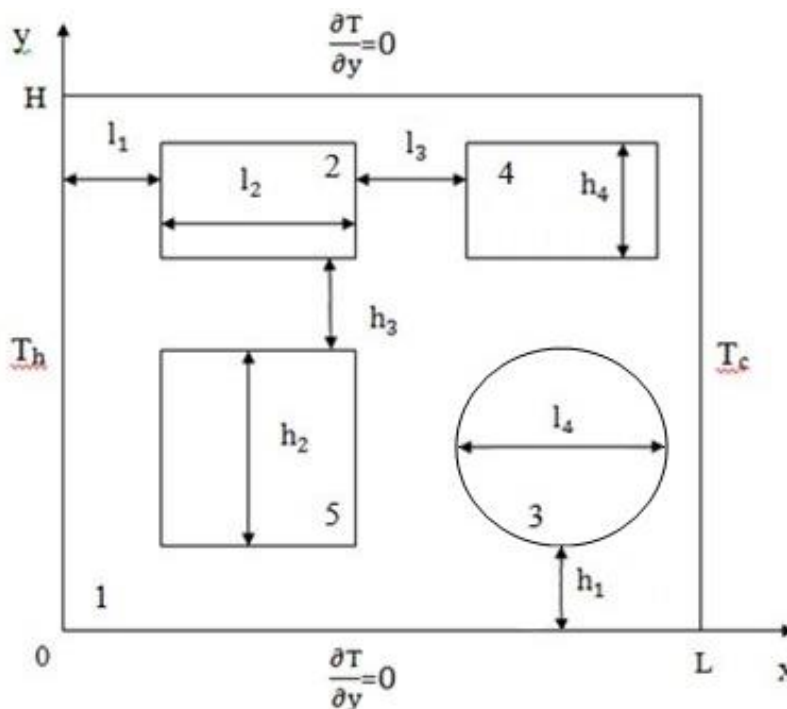


Рисунок 4. Область решения

В качестве материала пластины выберем медь (1 на рис. 4). Размеры пластины  $L = H = 0,5$  м. Материалы включения следующие:

1) сталь (2), коэффициент теплопроводности  $\lambda_2 = 46$  Вт/(м<sup>0</sup>·С), плотность  $\rho_2 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость  $c_2 = 460$  Дж/(кг<sup>0</sup>·С);

2) железо (3), коэффициент теплопроводности  $\lambda_3 = 71$  Вт/(м<sup>0</sup>·С), плотность  $\rho_3 = 7900$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость  $c_3 = 460$  Дж/(кг<sup>0</sup>·С);

3) сталь (4), коэффициент теплопроводности  $\lambda_4 = 46$  Вт/(м<sup>0</sup>·С), плотность  $\rho_4 = 7800$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость  $c_4 = 460$  Дж/(кг<sup>0</sup>·С);

4) железо (5), коэффициент теплопроводности  $\lambda_5 = 71$  Вт/(м<sup>0</sup>·С), плотность  $\rho_5 = 7900$  кг/м<sup>3</sup>, теплоемкость  $c_5 = 460$  Дж/(кг<sup>0</sup>·С).

На вертикальных границах области решения поддерживается постоянная температура  $T_h = 100$  °С при  $x = 0$  и  $T_c = 0$  °С при  $x = L$ . Горизонтальные границы являются адиабатическими  $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ . Начальная температура области решения  $T_0 = 50$  °С.

Математическая постановка задачи будет иметь вид:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right),$$

$$0 < x < l_1, \quad 0 < y < H;$$

$$l_1 \leq x \leq l_1 + l_2, \quad 0 < y < h_1,$$

$$h_1 + h_2 < y < h_1 + h_2 + h_3, \quad h_1 + h_2 + h_3 + h_4 < y < H;$$

$$l_1 + l_2 < x < l_1 + l_2 + l_3, \quad 0 < y < H;$$

$$l_1 + l_2 + l_3 \leq x \leq l_1 + l_2 + l_3 + l_4, \quad 0 < y < h_1,$$

$$h_1 + h_2 < y < h_1 + h_2 + h_3, \quad h_1 + h_2 + h_3 + h_4 < y < H;$$

$$l_1 + l_2 + l_3 + l_4 < x < L, \quad 0 < y < H;$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right),$$

$$l_1 < x < l_1 + l_2, h_1 + h_2 + h_3 < y < h_1 + h_2 + h_3 + h_4;$$

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_3}{\partial \varphi^2} \right),$$

$$l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 < y < h_1 + h_2;$$

$$0 < \varphi < 2\pi;$$

$$\rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} = \lambda_4 \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} \right),$$

$$l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 + h_2 + h_3 < y < h_1 + h_2 + h_3 + h_4;$$

$$\rho_5 c_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_5}{\partial y^2} \right), l_1 < x < l_1 + l_2, h_1 < y < h_1 + h_2. \quad (1)$$

Задаются начальные условия:

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

Затем задаются граничные условия для матрицы (область 1):

$$\begin{aligned} x = 0: T &= T_h, t > 0; \\ x = L: T &= T_c, t > 0; \\ y = 0: \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, t > 0; \\ y = H: \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, t > 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Граничные условия на включениях будут иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} x = l_1, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \\ x = l_1 + l_2, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} y = h_1 + h_2 + h_3, l_1 < x < l_1 + l_2, \\ y = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, l_1 < x < l_1 + l_2; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} x = l_1 + l_2 + l_3, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2, \\ x = l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} y = h_1, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, \\ y = h_1 + h_2, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4; \end{array} \right.$$



$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_4(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} x = l_1 + l_2 + l_3, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \\ x = l_1 + l_2 + l_3 + l_4, h_1 + h_2 + h_3 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_3 + h_4; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_4(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} y = h_1 + h_2 + h_3, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4, \\ y = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, l_1 + l_2 + l_3 < x < l_1 + l_2 + l_3 + l_4; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_5(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} x = l_1, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2, \\ x = l_1 + l_2, h_1 \leq y \leq h_1 + h_2; \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1(t, x, y) = T_5(t, x, y), \\ -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} = \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y}, \end{array} \right. \text{ при } \left\{ \begin{array}{l} y = h_1, l_1 < x < l_1 + l_2, \\ y = h_1 + h_2, l_1 < x < l_1 + l_2. \end{array} \right. \quad (4)$$

Для аппроксимации двумерного дифференциального уравнения по методу конечных разностей [3] разобьем пластину по толщине на N-1 равных промежутков и построим пространственно-временную сетку. Для дискретизации уравнений (1) используется локально-одномерная схема, которая является абсолютно устойчивой [4].

Решение полученных систем линейных алгебраических уравнений проводится методом прогонки, при этом наличие элементов (включений) учитывается в прогоночных коэффициентах на границах сопряжения, а также в коэффициентах канонического уравнения вида (5) в зависимости от материала элемента [3].

$$A_i \times T_{i+1}^{n+1} - B_i \times T_i^{n+1} + C_i \times T_{i-1}^{n+1} = F_i, \quad (5)$$

где  $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h^2}; \quad B_i = \frac{2 \times \lambda}{h^2} + \frac{\rho \times c}{\tau};$   
 $F_i = -\frac{\rho \times c}{\tau} \times T_i^n$

Алгоритм решения краевой задачи (1)–(4) состоит из последовательных шагов.

Вся область решения делится на однородные части, затем поэтапно решается система линейных алгебраических уравнений вида

$$\rho \times c \times \frac{T_{ij}^{n+1/2} - T_{ij}^n}{\tau} = \lambda \times \left( \frac{T_{i+1,j}^{n+1/2} - 2 \times T_{ij}^{n+1/2} + T_{i-1,j}^{n+1/2}}{h_x^2} \right). \quad (6)$$

При численном решении краевой задачи для области с криволинейной границей также строится разностная сетка. Для этого вводятся шаги сетки по координатам  $r_h, \phi_h$  – по линейной и угловой координатам  $r$  и  $\phi$ ; соответственно [3;4].

**Результаты компьютерного эксперимента**

Численное решение осуществлялось в программе, с оставленной на языке

C++ IDE Visual Studio. Полученные расчеты выводятся в текстовый файл данных. График распределения изотерм на пластине с четырьмя элементами строился по численным результатам файла данных с использованием графической библиотеки Dislin [5].

Результат компьютерного эксперимента показан на рис. 5, где представлен график распределения изотерм на пластине с четырьмя элементами.

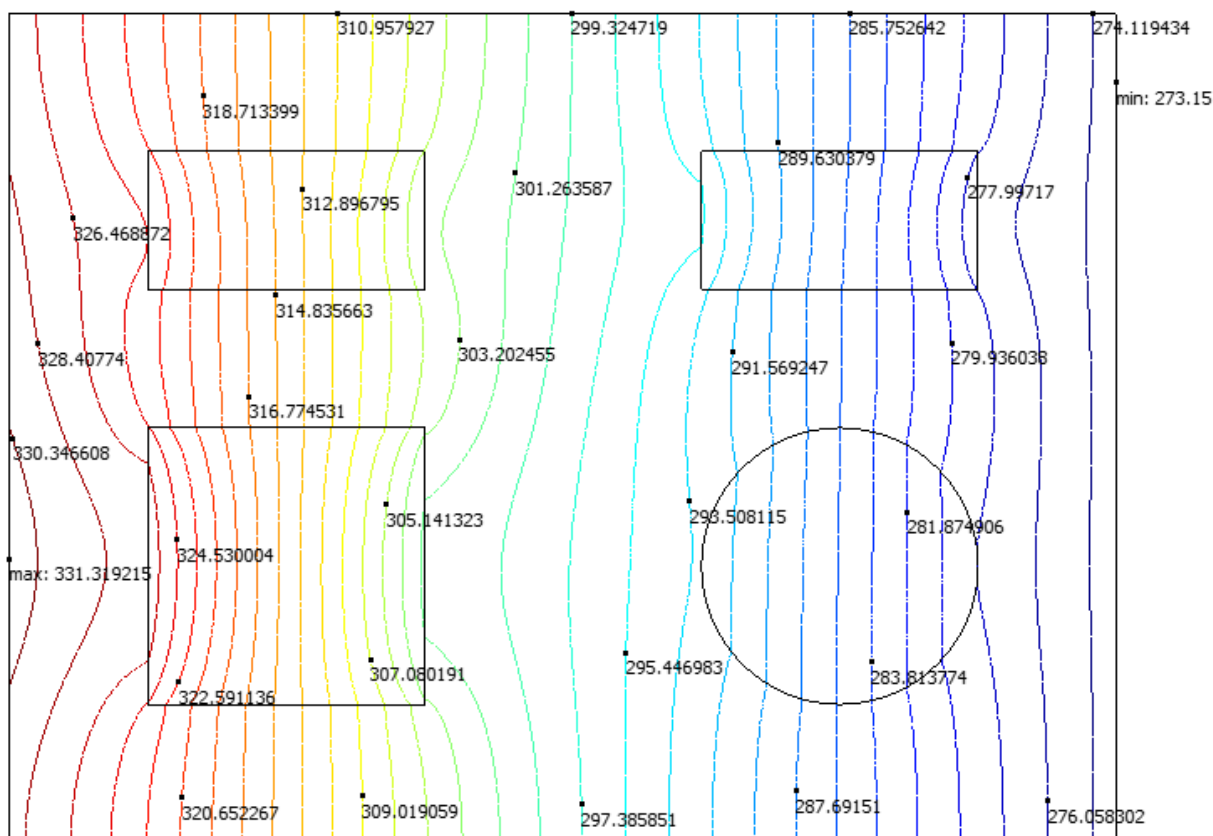


Рисунок 5. График изотерм на пластине с элементами

### Вывод

Из результатов визуализации тепловизионной съемки видно, что при увеличении потока тепла на телекоммуникационное оборудование температурный градиент заметно изменяется. Источниками тепла могут быть элементы, близко расположенные на электронной плате, у которых происходит нагрев от подачи на них большого напряжения. Для стабилизации работы элементов необходимо использовать различные системы охлаждения, которые способствуют стабильному и правильному функционированию данного электронного устройства. Кроме того, данную проблему также можно решить путем использования теплоустойчивых материалов.

Расчет теплового режима телекоммуникационного оборудования складыва-

ется из отдельных этапов, соответствующих уровням компоновки конструкций. Моделирование начинается с отдельных элементов узлов оборудования.

При использовании математической модели в виде нестационарного уравнения теплопроводности необходимо учитывать физические условия реальной задачи. Математическая модель переноса тепла описывается уравнением в декартовой системе координат, при этом следует задавать геометрические, физические, начальные и граничные условия. Аппроксимация уравнения конечными разностями приводит к системе линейных алгебраических уравнений, которые решаются численными методами с визуализацией результатов численного эксперимента.

### Литература

1. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. М., 1990. 312 с.
2. Дульнев Г. Н., Польшиков Б. В., Потягайло А. Ю. Разработка алгоритма иерархического моделирования процессов теплообмена в сложных радиоэлектронных комплексах // Радиотехника. 1979. Т. 34, П. С. 49–54.

3. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Разностные методы решения задач теплопроводности. Томск, 2007. 172 с.
4. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы. М., 1989. 432 с.
5. URL: <https://dislin.de/index.html>

#### References

1. Dul'nev G. N., Parfenov V. G., Sigalov A. V. Metody rascheta teplovogo rezhima priborov. M., 1990. 312 s.
2. Dul'nev G. N., Polycikov B. V., Potyagajlo A. YU. Razrabotka algoritma ierarhicheskogo modelirovaniya processov teploobmena v slozhnyh radioelektronnyh kompleksah // Radiotekhnika. 1979. T. 34. S. 49–54.
3. Kuznecov G. V., SHERemet M. A. Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti. Tomsk, 2007. 172 s.
4. Samarskij A. A., Gulin A. V. CHislennye metody. M., 1989. 432 s.
5. URL: <https://dislin.de/index.html>