

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**Государственное образовательное учреждение**

высшего профессионального образования  
« САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ПОЛЕЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ  
СТРУКТУР РЭС**

Методические указания к лабораторной работе

Самара 2006

УДК 621.396.6

**Цифровое моделирование температурных полей многокомпонентных структур РЭС:** Методические указания/ Самарский государственный аэрокосмический университет; Сост. Г.Ф.Краснощекова, В.А.Зеленский. – Самара,2006. – 20 с.

В методических указаниях рассматривается цифровой метод моделирования температурных полей неупорядоченных структур РЭС, методика проведения эксперимента, алгоритм расчета.

Предназначены для студентов очной и вечерней формы обучения радиотехнического факультета специальности 2008, изучающих курс «Моделирование тепловых процессов в РЭС».

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензент:

Цель работы – изучение методики цифрового моделирования нестационарных и стационарных температурных полей неупорядоченных структур радиоэлектронных средств.

## **I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Одной из важнейших задач, поставленных перед разработчиками и конструкторами радиоэлектронных средств (РЭС), является интенсификация процесса создания устройств на основе применения систем автоматического проектирования (САПР). В этом случае анализ температурного поля устройства составляет подсистему тепловые режимы. Эта подсистема теплового проектирования включает в себя следующие разделы:

- способы моделирования температурных полей сложных устройств и их математическое описание;
- методы автоматизированного теплового проектирования и расчета РЭС в различных условиях его эксплуатации;
- полную систему теплового проектирования.

Среди конструкторов РЭС все большее распространение для расчета температурного поля получает метод конечных разностей, или цифровое моделирование температурных полей. Его можно было бы назвать и методом кубиков, поскольку в основе его лежит построение моделей сложных физических процессов, происходящих в больших объемах пространства, состоящих из простых элементарных процессов, происходящих в малом объеме кубической формы.

Суть этого метода в следующем: Конструкция разбивается на части прямоугольной формы, которые назовем элементами. Для повышения точности расчета и облегчения составления программы все элементы следует делать одинаковых размеров. В центре элемента выделяется точка – узел сетки, в котором и вычисляется температура. В интервале между узлами температура считается изменяющейся по линейному закону, т.е. температура в такой модели будет кусочно-линейной функцией координат, что показано на рисунке 1.

Далее дифференциальные уравнения, описывающие тепловые явления заменяются на уравнения в конечных разностях, т.е. дифференциалы заменяются на приращения в соответствующих точках.

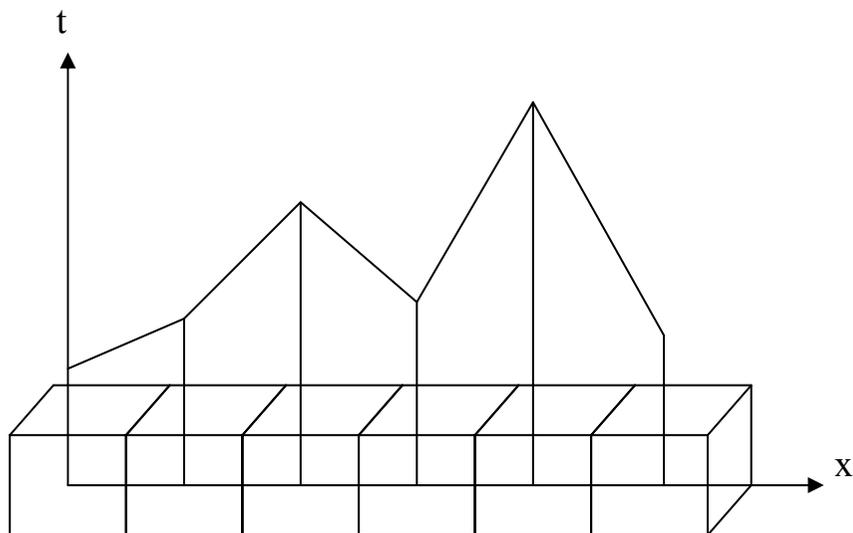


Рисунок 1. Кусочно-линейная аппроксимация температуры.

Например, уравнение теплопроводности изотропного тела в дифференциальной форме:

$$\lambda \cdot \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_V = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau},$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $t$  – температура;  $q_V$  – удельная мощность выделения внутренних источников;  $C_p$  – теплоемкость тела при постоянном давлении;  $\rho$  – плотность;  $\tau$  – время.

В конечных разностях это уравнение имеет вид:

$$\lambda \cdot \left( \frac{\Delta \left( \frac{\Delta t_x}{l_x} \right)}{l_x} + \frac{\Delta \left( \frac{\Delta t_y}{l_y} \right)}{l_y} + \frac{\Delta \left( \frac{\Delta t_z}{l_z} \right)}{l_z} \right) + q_V = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\Delta t_\tau}{\tau}$$

где  $l_x, l_y, l_z$  – приращения по координатам, равные размерам элемента по этим координатам;

$$\Delta t_x^+ = t_{i-1,j,k} - t_{i,j,k} \quad \text{или} \quad \Delta t_x^- = t_{i,j,k} - t_{i+1,j,k},$$

( $t_{i,j,k}$  - температура в элементе с индексами i, j, k);

аналогично для других координат

$$\Delta t_y^+ = t_{i,j-1,k} - t_{i,j,k}, \quad \Delta t_y^- = t_{i,j,k} - t_{i,j+1,k},$$

$$\Delta t_z^+ = t_{i,j,k-1} - t_{i,j,k}, \quad \Delta t_z^- = t_{i,j,k} - t_{i,j,k+1}.$$

Величины с “+” относятся к входящим, а с “-” – к выходящим потокам тепла.

На рисунке 2  $J_x^+, J_x^-, J_y^+, J_y^-, J_z^+, J_z^-$  - плотности потоков по координатам x, y, z соответственно, а  $\Delta t_c / \tau$  - изменение температуры в элементе с индексами i, j, k за момент времени  $\Delta t$ .

Данное уравнение легко решается от начального момента времени до интересующего времени работы устройства через равные кванты времени  $\tau$ . Обычно за начальный момент времени берется момент включения аппаратуры, в этот момент времени ( $\tau = 0$ ) температура в элементах равна температуре окружающей среды  $t_c$ . Через момент времени  $\tau$  определяется температура в узлах, где происходит выделение тепла, в остальных же она пока равна  $t$ . Так обходя все узлы по порядку, можно определить температуру в них в любой момент времени.

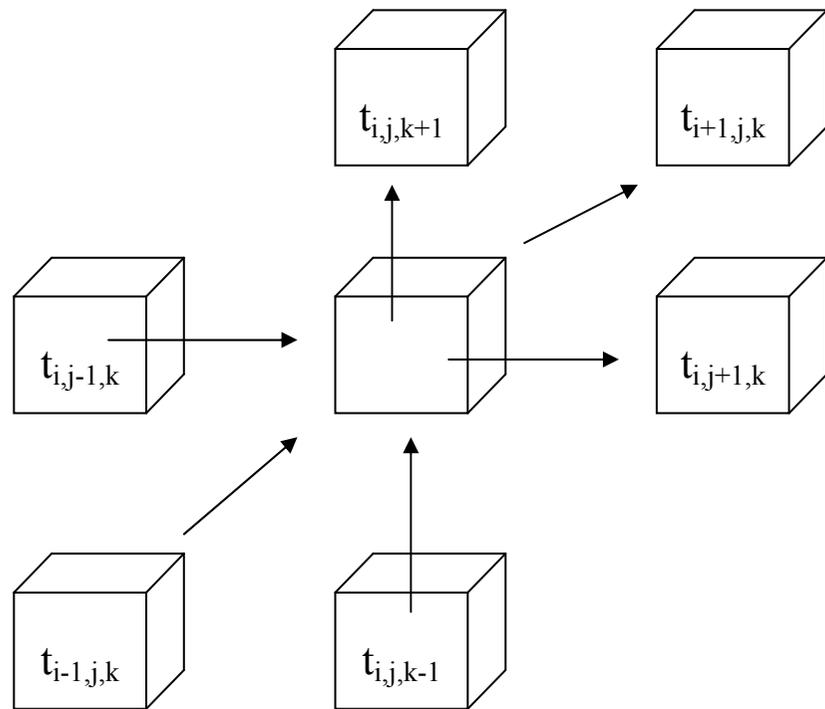


Рисунок 2. Распределение тепла в нескольких элементах.

### 1.1 Анализ тепловых моделей РЭС

Радиоаппаратуру можно рассматривать как систему многих тел с сосредоточенными источниками тепловой энергии. Анализ температурных полей таких систем является сложной задачей, решение которой выполняется приближенными методами. Исследователь устанавливает количественную зависимость между температурами ограниченного числа наиболее ответственных мест конструкции и существенными факторами, влияющими на процесс теплообмена. При экспериментальном решении задачи эта работа может проводиться на самом объекте исследования; аналитическое решение исключает такой подход, так как тепловые процессы в реальной конструкции, как правило, не поддаются точному математическому описанию из-за наличия большого числа основных и дополнительных факторов, влияющих на протекание процесса. Поэтому необходим переход к модели конструкции. В настоящее время получили

распространение две группы тепловых моделей РЭС. На рисунке 3 схематично–показаны тепловые модели первой и второй группы.

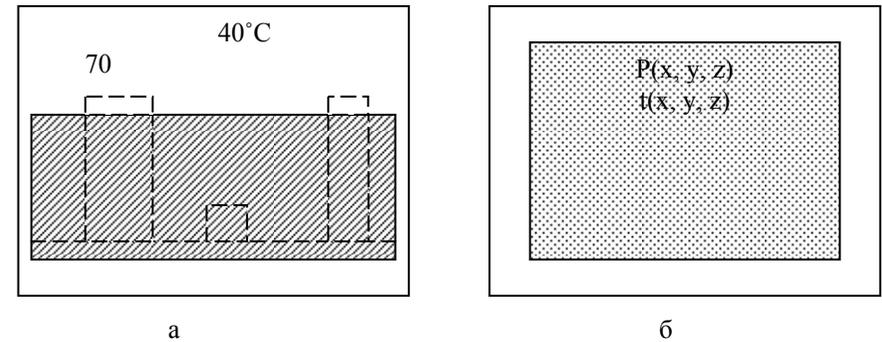


Рисунок 3. Виды тепловых моделей РЭС: а – тепловая модель I группы; б – тепловая модель II группы.

Характерной особенностью моделей первой группы является разделение поверхностей модели РЭС на отдельные условно изотермические участки. Процесс переноса тепла в таких моделях рассматривается так, как если бы он протекал между изотермическими поверхностями.

В тепловых моделях второй группы нагретая зона РЭС, представляющая собой неоднородную систему многих тел, идеализируется в виде однородного тела. Свойства этого тела характеризуются эффективными значениями теплофизических параметров – коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{экв}}$  и коэффициента теплоемкости  $C_{\text{экв}}$ . Здесь нагретая зона – однородное анизотропное тело с распределенными по объему источниками энергии. Информационные возможности такой модели весьма велики, так как ее исследование позволяет получить аналитическое выражение для поля температур. В настоящей работе для расчета температурного поля объекта исследования используется модель второй группы, но для увеличения точности расчета осредненных теплофизических параметров конструкция делится не на одно анизотропное тело, а на несколько анизотропных зон.

## 1.2 Расчет осредненных теплофизических параметров при цифровом моделировании температурных полей

РЭС – многокомпонентная структура с различными теплофизическими параметрами; чтобы рассчитать температурный режим

такой конструкции, необходимо перейти к модели второй группы. Выполняется этот переход следующим образом.

Разобьем объект исследования на  $n$  элементов или  $n$  элементарных объемов. В каждом таком элементе может находиться какой-либо однородный материал, либо несколько различных материалов, из которых состоит объект исследования (радиоэлемент, компаунд, плата, корпус, кронштейн и т. д.), т.е. материалы с различными теплофизическими параметрами  $\lambda_i, C_i$ .

Рассмотрим такой элементарный объем отдельно, так как для каждого такого объема необходимо найти осредненные теплофизические параметры. Разобьем этот элемент на области так, чтобы в каждую область вошел какой-либо один однородный материал.

Структура разбиения следующая:

$V_1$  – однородная структура с  $\lambda_1, C_1$ ;  $V_2$  – однородная структура с  $\lambda_2, C_2$  и т.д.

Значит  $V_0 = \sum V_i$ . Линейные размеры  $h_1; h_2; h_3; \dots; h_i$

определяются:

$$h_1 = \sqrt[3]{V_1}; \quad h_2 = \sqrt[3]{V_2 + V_1} - \sqrt[3]{V_1};$$

$$h_i = \sqrt[3]{V_i + V_{i-1} + \dots + V_1} - \sqrt[3]{V_{i-1} + V_{i-2} + \dots + V_1}.$$

Основной параметр при расчете температурного поля – тепловое сопротивление – может быть определено:

$$R_{TCT} = \sum_{i=1}^n R_{CЛ} = \frac{1}{S_{iCЛ}} \cdot \left( \frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{h_n}{\lambda_n} \right) = \frac{A}{S_i};$$

$$S_{CЛ1} = h_1^2; \quad S_{CЛ2} = h_2(2h_1 + h_2);$$

$$\dots \dots \dots$$

$$S_{CЛn} = h_n [2(h_1 + h_2 + \dots + h_{n-1}) + h_n].$$

Для этого элемента с объемом  $V_0$  тепловое сопротивление

$$R_{T\Sigma} = \int_0^h \frac{dh}{\lambda S} = \frac{l}{\lambda_{экв} \cdot h_{куб}}.$$

Приравняв две величины  $R_{TCT}$  и  $R_{T\Sigma}$ , можно найти осредненный

теплофизический параметр  $\lambda_{\text{экв}}$

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2) \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{h_{\text{куб}} \cdot ((\lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n) h_1 + (\lambda_1 \lambda_3 \dots \lambda_n) h_2 + \dots)},$$

или более общее выражение

$$\lambda_{\text{экв}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i^2 \prod_{j=1}^n \lambda_j}{h_{\text{куб}} \sum_{i=1}^n \left( h_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \lambda_j \right)}$$

Вторым теплофизическим параметром, влияющим на тепловой режим объекта исследования, является теплоемкость  $C_{\text{экв}}$ . Для указанного разбиения в каждой части элемента массы будет накапливаться тепло, равное

$$q_1 = C_1 V_1 \Delta t; \quad q_2 = C_2 V_2 \Delta t; \quad q_n = C_n V_n \Delta t.$$

А общее количество теплоты, которое может накопить рассматриваемый элемент массы,

$$q = (C_1 V_1 + C_2 V_2 + \dots + C_n V_n) \Delta t.$$

Если заменить этот неоднородный элемент однородным, но уже с осредненным значением теплоемкости  $C_{\text{экв}}$ , то количество теплоты в нем –  $q$  – не должно измениться, т.е.

$$q = C_{\text{экв}} V_0 \Delta t$$

Таким образом, значение эквивалентной теплоемкости определяется выражением:

$$C_{\text{экв}} = \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2 + \dots + C_n V_n}{V_0}$$

### 1.3 Расчет температурного поля в модели второй группы

Вернемся к рисунку 2, только будем считать, что в каждом элементе уже найдены  $\lambda_{\text{экв}}$  и  $C_{\text{экв}}$  по выше предложенным формулам. Известно, что типовым уравнением движения энергии является закон сохранения энергии: количество притекающей к данному элементу энергии равно количеству энергии, накапливающейся в элементе. Этот закон, как правило, записывается через величину плотности теплового потока:

$$\frac{J_X^+ - J_X^-}{l_X} + \frac{J_Y^+ - J_Y^-}{l_Y} + \frac{J_Z^+ - J_Z^-}{l_Z} + q = C_{\text{экв}} \frac{t(\tau + \Delta\tau) - t}{\tau},$$

Здесь  $J_X^+, \dots, J_Z^-$  - удельные плотности тепловых потоков;  $l_X, l_Y, l_Z$  - линейные размеры элемента вдоль осей;  $C_{\text{экв}}$  - осредненная теплоемкость элемента;  $\tau$  - интервал времени;  $t(\tau + \Delta\tau) - t$  - приращение температуры за интервал времени. Для анизотропной модели

$$J_X^+ = \frac{t_X^+ - t_0}{R_{T\Sigma}},$$

где

$$R_{T\Sigma} = \frac{l_X}{2S} \left( \frac{1}{\lambda_{0\text{экв}}} + \frac{1}{\lambda_{X\text{экв}}^+} \right) = \frac{1}{2l} \left( \frac{\lambda_{0\text{экв}} + \lambda_{X\text{экв}}^+}{\lambda_{0\text{экв}} \cdot \lambda_{X\text{экв}}^+} \right).$$

Обозначим

$$K_{0X\text{экв}}^+ = \frac{\lambda_{0\text{экв}} \cdot \lambda_{X\text{экв}}^+}{\lambda_{0\text{экв}} + \lambda_{X\text{экв}}^+}.$$

т. е.

$$J_X^+ = 2l \cdot K_{0X\text{экв}}^+ \cdot (t_X^+ - t_0).$$

Аналогично для всех направлений x, y, z. За время  $\Delta t$  изменение температуры будет

$$\Delta t_{0X}^+ = \frac{\Delta \tau \cdot J_X^+}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0X\text{экв}}^+ \cdot (t_X^+ - t_0)];$$

$$\Delta t_{0X}^- = \frac{\Delta \tau \cdot J_X^-}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0X\text{экв}}^- \cdot (t_X^- - t_0)];$$

$$\Delta t_{0Y}^+ = \frac{\Delta \tau \cdot J_Y^+}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Y\text{экв}}^+ \cdot (t_Y^+ - t_0)];$$

$$\Delta t_{0Y}^- = \frac{\Delta \tau \cdot J_Y^-}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Y\text{экв}}^- \cdot (t_Y^- - t_0)];$$

$$\Delta t_{0Z}^+ = \frac{\Delta \tau \cdot J_Z^+}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Z\text{экв}}^+ \cdot (t_Z^+ - t_0)];$$

$$\Delta t_{0Z}^- = \frac{\Delta \tau \cdot J_Z^-}{C_{0\text{экв}}} = \frac{\Delta \tau}{C_{0\text{экв}}} \cdot 2l [K_{0Z\text{экв}}^- \cdot (t_Z^- - t_0)].$$

При условии, что время  $\Delta t$  много меньше постоянной времени ячейки

$$\Delta \tau \leq C_{0\text{экв}} \cdot R_{T\Sigma} = \frac{C_{0\text{уд}} j V_0}{2l \cdot K_{0X\text{экв}}^i},$$

где  $j$  – удельный вес, вводится для получения объемной теплоемкости,  
 $V_0$  – объем ячейки.

За время  $\Delta t$  изменение температуры вдоль осей будет:

$$\Delta t_{0X}^+ = t_{0X}^+ - t_0;$$

$$\Delta t_{0X}^- = t_{0X}^- - t_0;$$

$$\Delta t_{0Y}^+ = t_{0Y}^+ - t_0;$$

$$\Delta t_{0Y}^- = t_{0Y}^- - t_0;$$

$$\Delta t_{0Z}^+ = t_{0Z}^+ - t_0;$$

$$\Delta t_{0Z}^- = t_{0Z}^- - t_0.$$

т. е.

$$\Delta t_0 = (\Delta t_{0X}^+ + \Delta t_{0X}^-) + (\Delta t_{0Y}^+ + \Delta t_{0Y}^-) + (\Delta t_{0Z}^+ + \Delta t_{0Z}^-) + \Delta t_{0q},$$

где  $\Delta t_{0q}$  - изменение температуры за счет удельного тепловыделения  $q$ .

Если в ячейке  $q = 0$ , то в уравнении оно отсутствует.

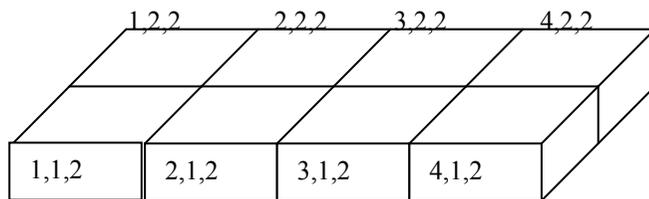
## 2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Методика расчета температурного поля, описанная выше, реализуется алгоритмом, блок-схема которого приведена в Приложении 1.

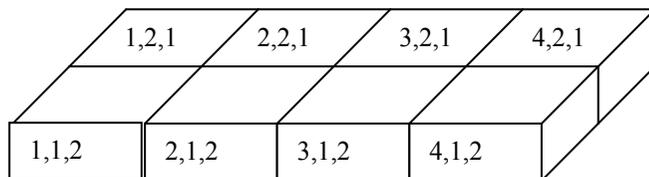
Программа, реализующая данный алгоритм и написанная на языке Turbo Pascal приведена в Приложении 2.

### 2.1 Особенности программы

Расчет температурного поля РЭС является трехмерной задачей, поэтому и массивы температур, мощностей тепловыделения, всех теплофизических параметров и т. д. должны быть трехмерными. Элементы нумеруются снизу вверх, слева направо, от ближнего к дальнему, как изображено на рисунке 4.



2<sup>й</sup> слой



1<sup>й</sup> слой

Рисунок 4. Нумерация элементов в разбиении

## 2.2 Подготовка исходных данных

Для расчета температурного поля объекта исследования, выполненного с помощью цифрового моделирования, потребуются следующие данные:

- длина, ширина, и высота конструкции, мм;
- число слоев разбиения по длине, ширине и высоте;
- количество источников тепла;
- координаты источников тепла  $x_i, y_i, z_i$  ;
- мощности источников тепла, Вт;

Если в один кубик попало сразу несколько источников, то они принимаются за один источник с мощностью, равной суммарной мощности.

Координаты кубика определяются  $x_i, y_i, z_i$  – номерами слоев, перпендикулярными соответственно длине, ширине, высоте, т.е. должна быть не в метрах, а в номерах слоев разбиения.

- теплоемкость примененных материалов и окружающей среды, Дж/м<sup>3</sup>·К.

Заметим, что в таблицах обычно приводятся значения теплоемкости в Дж/кг·К, поэтому, чтобы получить необходимую размерность, надо табличное значение умножить на плотность этого вещества в кг/м<sup>3</sup>;

- теплопроводность применяемых материалов и окружающей среды Вт/м·К;
- количество материалов, их объем в каждом кубике, %;
- температура окружающей среды, °С;
- желаемый шаг по времени, с.

## 2.3 Работа с программой

Для запуска программы необходимо включить персональный компьютер с соответствующем программным обеспечением и запустить файл: “Tempres.exe”.

Максимальное число слоев разбиения 8×8×6, максимальное число материалов в одном кубике –10.

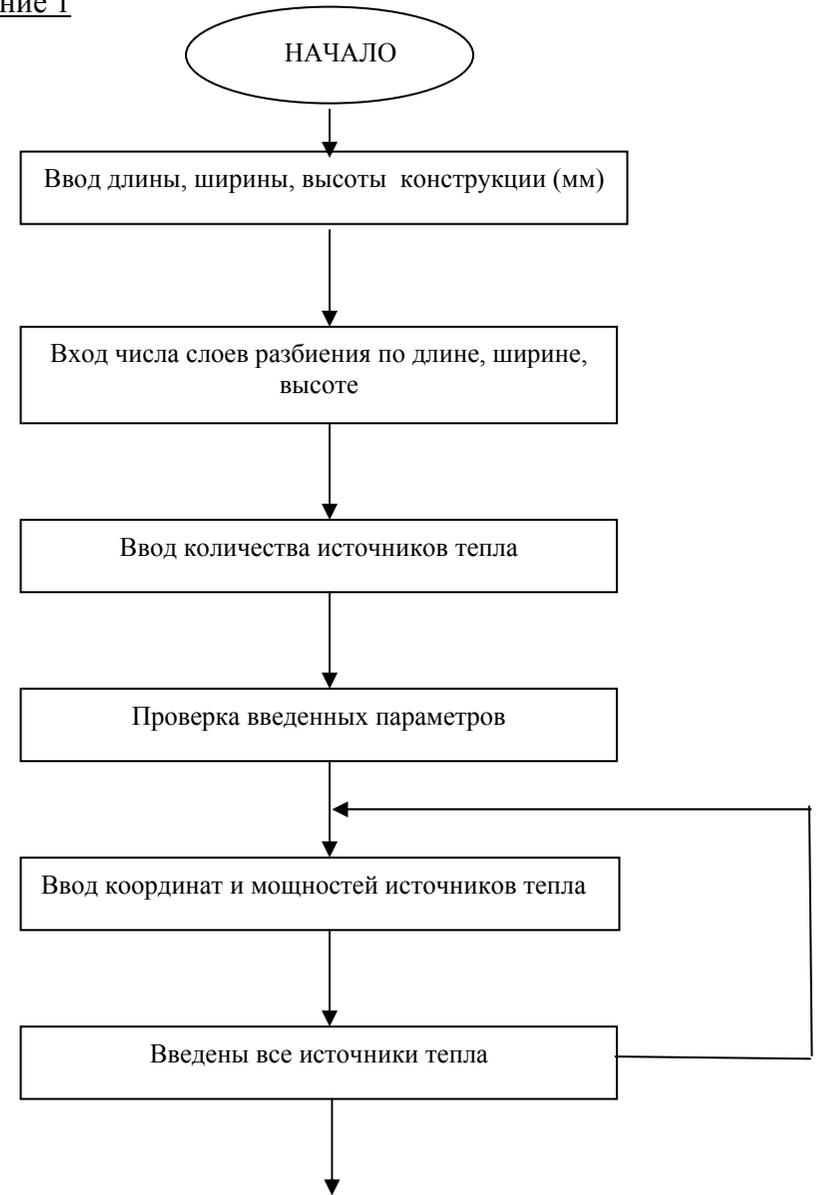
Наиболее часто применяемые материалы приведены в Приложении 3.

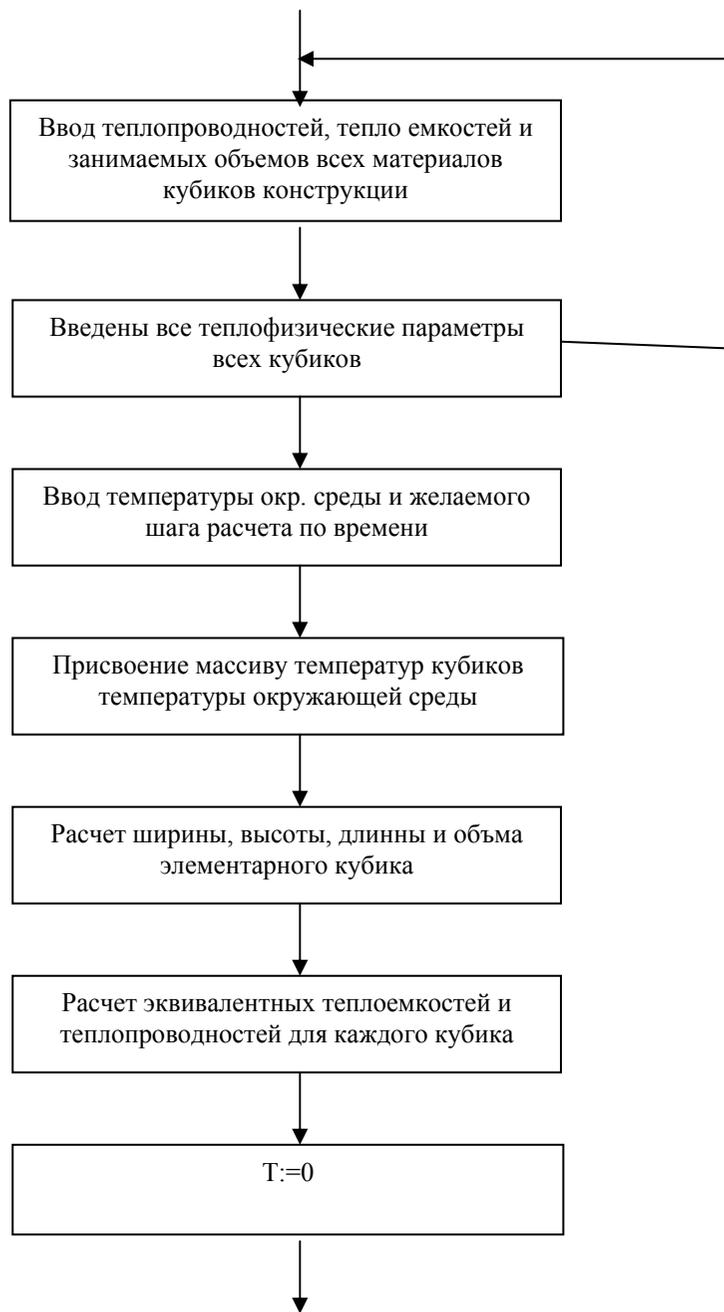
Перед запуском программы для упрощения работы составляется таблица состава элементов, приведенная ниже.

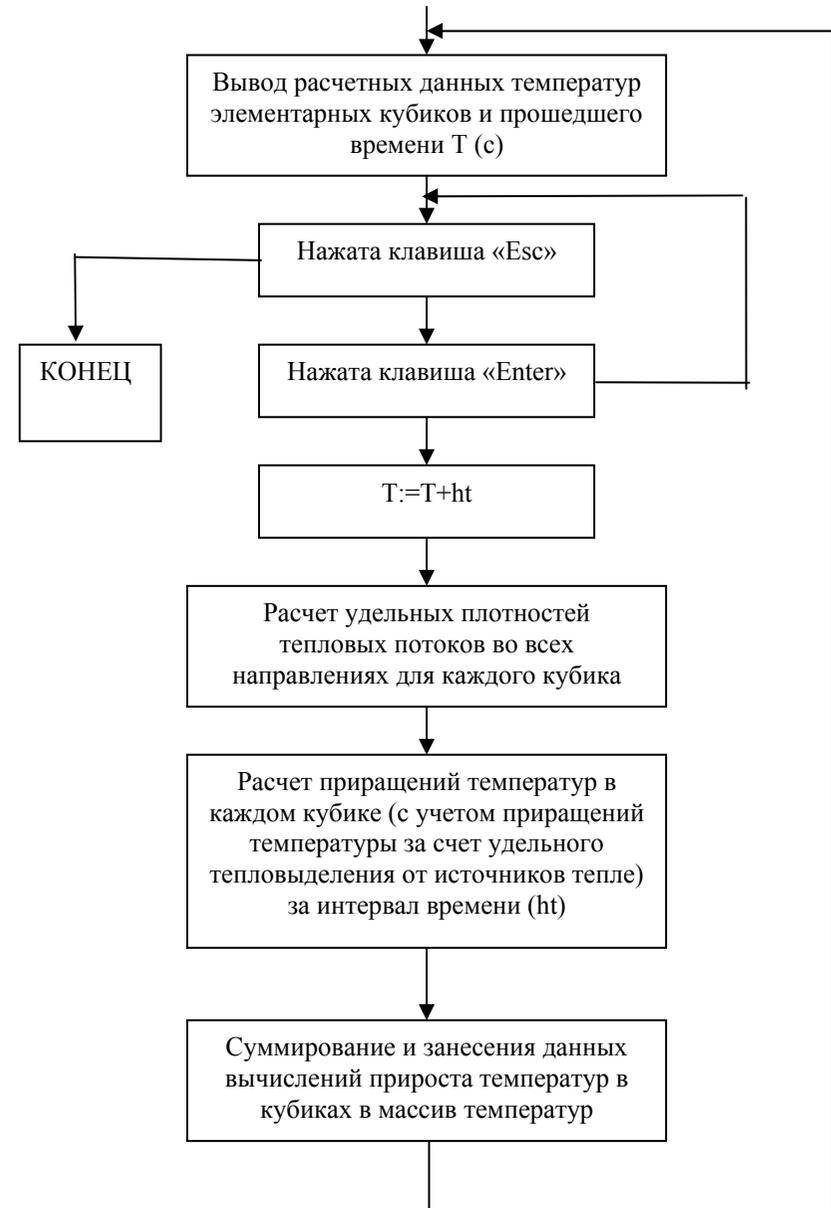
Таблица 1. Состав элементов

№ кубика	Элемент	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/м·К	Теплоемкость С, Дж/м <sup>3</sup> ·К	Занимаемый объем, %	Выделяемая мощность, Вт
1,1,1	1. Воздух	0,026	1212	100	-
2,1,1	1. Воздух	0,026	1212	80	-
	2. Транзистор	58,7	$3,9 \cdot 10^6$	20	2
3,1,1	1. Воздух	0,026	1212	20	-
	2. Сердечник трансформатора	58,7	$3,9 \cdot 10^6$	50	-
	3. Обмотка трансформатора	390	$3,5 \cdot 10^6$	30	-
4,1,1	1. Воздух	0,026	1212	35	-
	2. Часть радиатора	210	$2,4 \cdot 10^6$	65	10
1,2,1	1. Воздух	0,026	1212	100	-
...	...	...	...	...	...

Приложение 1







## Приложение 2

```
Program TEMPRES;
uses crt,draph;
var x,y,z:integer;
    hx,hy,hz: integer;
    nt: integer;
    a:char;
    s,ss,sss:string;
    P:array [1..8,1..8,1..6] of integer;
    C:array[1..8,1..8,1..6,1..10] of real;
    L:array[1..8,1..8,1..6,1..10] of real;
    nmk:array[1..8,1..8,1..6] of integer;
    V:array[1..8,1..8,1..6,1..10] of integer;
    t,ht:integer;
    sec:integer;
    temp:array[1..8,1..8,1..6] of real;
    il,i,j,k,f,w,gd,gm,u,ii,iii:integer;
    hl,h2,h3:real;
    chisl,chisl1,znam,znam2,ho:real;
    lv,tpx,tmx,tpy,tmy,tpz,tmz,toq:real;
    label en,1,raschet;
procedure kuby;
begin
for j:=0 to (hz-1) do
begin
for k:=1 to 15 do
begin
setcolor(7);
line((150+hx*35),350-(j*hy*25)+k,(150+hx*35)+(hy*15),350-j*hy*25)-
(hy*15)+k);
end;
for i:=150 to (150+hx*35) do
begin
setcolor(8);
line(i,350-(j*hy*25),i+(hy*15),350-(j*hy*25)-(hy* 15));
setcolor (7);
line(i,350-(j*hy*25),i,365-(j*hy*25));
end;
```

```

end;
setcolor (14);
for j:=0 to (hz-i) do
begin
line(150+(hx*35),365-(j*hy*25),150+(hx*35)+(hy*15),365-(hy*15)-(j*hy*25));
line(150,365-(j*hy*25),150+(hx*35),365-(j*hy*25));
for i:=0 to hx do
begin
line(150+(i*35),350-(j*hy*25),150+(i*35),365-(j*hy*25));
line(150+(i*35),350-(j*hy*25),150+(i*35)+(hy*15),350-(hy*15)-(j*hy*25));
end;
for i:=0 to hy do
begin
line(150+(i*15),350-(i*15)-(j*hy*25),150+(hx*35)+(i*15),350-(i*15)-
(j*hy*25));
line(150+(hx*35)+(i*15),365-(i*15)-(j*hy*25),150+(hx*35)+(i*15),350-(i*15)-
(j*hy*25));
end;
end;
end;
end;
procedure vyvodtemp;
begin
for k:=1 to hz do
begin
for j:=1 to hy do
begin
for i:=1 to hx do
begin
u:=trunc(ternp[i,j,k]);
str(u,s);
setcolor(15);
if (u>99) then f:=0 else f:=5;
outtextxy(f+113+(i*35)+(j*15),355-(j*15)-((k-1)*hy*25),s);
end;
end;
end;
end;
end;
begin
clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);wnteln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЭС');writeln;
textcolor(15);write('Введите длину конструкции (мм)');

```

```

textcolor(14);readln(x);writeln;
textcolor(15);write('Введите ширину конструкции (мм)');
textcolor(14);readln(y);writeln;
textcolor(15);write('Введите высоту конструкции (мм)');
textcolor(14);readln(z);writeln;
textcolor(15);write('Введите число слоев разбиения по длине ');
textcolor(14);readln(hz);writeln;
textcolor(15);write('Введите число слоев разбиения по ширине ');
textcolor(14);readln(hy);writeln;
textcolor(15);write('Введите число слоев разбиения по высоте ');
textcolor(14);readln(hz);writeln;
textcolor(15);write('Введите количество источников тепла в конструкции');
textcolor(14);readln(nt);writeln;
clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЭС');writeln;

if (nt>(hx*hy*hz)) then nt:=(hx*hy*hz);

for ii:=1 to nt do
begin
textcolor(15);write('Введите координату [X] ',ii,'-го источника тепла');
textcolor( 14);readln(i);
textcolor(15);write('Введите координату [Y] ',ii,'-го источника тепла');
textcolor(14);readln(j);
textcolor(15);write('Введите координату [Z] ',ii,'-го источника тепла');
textcolor( 14);readln(k);
textcolor(15);write(' Введите мощность источника тепла [Вт] [' ,i ,',j ,',k ,'];
textcolor(14);readln(p[ij,k]);
clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЭС');writeln;
end;

fork:=1 to hz do
begin
forj:=1 to hy do
begin
for i:=1 to hx do
begin
textcolor(15);write('Введите количество материалов в кубике [' ,i ,',j ,',k ,'] ');

```

```

textcolor(14);readln(nmk[i,j,k]);
end;
clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЭС');writeln;
end;
end;

for k:=1 to hz do
begin
for j:=1 to hy do

begin
for i:=1 to hx do
begin
for ii:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
textcolor(15);write('Введите теплопроводность ',ii,'-го материала в кубике
[';i;';j;';k;'] [Вт/м*К]);
textcolor(14);readln(l[i,j,k,i]);
textcolor(15);write('Введите теплоемкость ',ii,'-го материала в кубике
[';i;';j;';k;']
[Дж/м^3*К]');
textcolor(14);readln(c[i,j,k,ii]);
textcolor(15);write('Введите занимаемый объем ',ii,'-го материала в кубике
[';i;';j;';k;'] [%]');
textcolor( 14);readln(v[i,j,k,ii]);
end;
end;
clrscr;
textcolor(12);
gotoxy(25,1);writeln('РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЭС');writeln;
end;
end;
textcolor(15);write('Введите температуру окружающей среды (гр. С)');
textcolor(14);readln(t);writeln;
textcolor(15);write('Введите желаемый шаг по времени (сек.)');
textcolor(14);readln(ht);writeln;

```

```

initgraph(gd,gm,'c:\pascal\ ');

setfillstyle(1,3);
bar(0,0,639,479);
kuby;
fori:=1 to hx do
begin
for j := 1 to hy do
begin
fork:=1 to hz do
begin
temp[i,j,k]:=t;
end;
end;
end;
hl:=(x/hx);
h2:=(y/hy);
h3:=(z/hz);

h0:=(h1+h2+h3)/(3*1000);

lv:=35;
fork:=1 to hz do
begin
for j:=1 to hy do
begin
for i:=1 to hx do
begin
chisl:=0;
for f:=1 to nmk[i,j,k] do
begin chisl:=chisl+((ho*v[i,j,k,f]/100)*(ho*v[i,j,k,f]/100));
end;
end;
end;
end;
forf:=1 to nmk[i,j,k]do
begin
chisl:=chisl*I[i,j,k,f];
end;
znam2:=0;
for f:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
znam:=I;

```

```

for w:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
znam:=znam*(ho*v[ij,k,w]/100)*l[ij,k,w];
end;
znam2:=znam2+znam*(ho*v[ij,k,f]/100);
end;
znam:=znam2*ho;
l[i,j,k,l]:=chisl/znam;
chisl:=0;
forf:=1 to nmk[i,j,k] do
begin
chisl:=chisl+(c[ij,k,f]*v[ij,k,f]/100);
end;
c[ij,k,l]:=chisl;
end;
end;
end;

```

```

vyvodtemp;
setcolor(14);outtextxy(250,450,'Прошедшее время: 0 сек');
outtextxy(10,20,'Температура');
outtextxy(10,30,'окр. среды:');
str(t,s);
outtextxy(30,40,'t= '+s);

outtextxy(490,20,'Размер'),
outtextxy(490,30,'l кубика:');
str((x/hx):3:1 ,s);str((y/hy):3:1 ,ss);str((z/hz):3:1,sss);
outtextxy(490,40,s+l'+ss+ix,+sss+' мм');
str(ht,s);
setcolor(14);outtextxy(10,450,'Шаг по времени T= '+s+' сек.');
```

```

1:
a:=readkey;
if (a=#27) then goto en;
if (a=#13) then goto raschet;
goto 1;
raschet:

```

```

for il:=l to ht do
begin
sec:=sec+l;
for k:=l to hz do
begin
for j:=l to hy do
begin
for i:=l to hx do
begin
if(i>l)thentmx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h1*(l[i,j,k,l]*l[i-1,j,k,l]/(l[i,j,k,l]+1[ i,j,k,l]))*
(temp[i-1,j,k]-temp[i,j,k]);
if(j>l)thentry:=(1/c[i,j,k,l])*2*h2*(l[i,j,k,l]*l[i,j-1,k,l]/(l[i,j,k,l]+1[ i,j,k,l]))*
(temp[i,j-1,k]-temp[i,j,k]);
if(k>l)thentmz:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3*(l[i,j,k,l]*l[i,j,k-1,l]/(l[i,j,k,l]+1[ i,j,k,l]))*
(temp[i,j,k-1]-temp[i,j,k]);
if(i<hx)then
tpx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h1*(l[i,j,k,l]*l[i+1,j,k,l]/(l[i,j,k,l]+1[ i,j,k,l]))*
(temp[i+1,j,k]-temp[i,j,k]);
if(j<hy)then
tpy:=(1/c[i,j,k,l])*2*h2*(l[i,j,k,l]*l[i,j+1,k,l]/(l[i,j,k,l]+1[ i,j,k,l]))*
(temp[i,j+1,k]-temp[i,j,k]);
if(j<hz)then
tpz:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3*(l[i,j,k,l]*l[i,j,k+1,l]/(l[i,j,k,l]+1[ i,j,k,l]))*
(temp[i,j,k+1]-temp[i,j,k]);

if (i=l) then tmx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h1 *(1[i,j,k,l]*lv/(l[i j,k,1]+lv))*
(t-temp[i,j,k]);
if(j=l) then tmy:=(1/c[i,j,k,l])*2*h2 *(1[i,j,k,l]*lv/(l[i j,k,1]+lv))*
(t-temp[i,j,k]);
if(k=l) then tmz:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3 *(1[i,j,k,l]*lv/(l[i j,k,1]+lv))*
(t-temp[i,j,k]);
if(i=hx) then tpx:=(1/c[i,j,k,l])*2*h1 *(1[i,j,k,l]*lv/(l[i j,k,1]+lv))*
(t-temp[i,j,k]);
if(j=hy)then tpy:=(1/c[i,j,k,l])*2*h2 *(1[i,j,k,l]*lv/(l[i j,k,1]+lv))*
(t-temp[i,j,k]);
if(k=hz)then tpz:=(1/c[i,j,k,l])*2*h3 *(1[i,j,k,l]*lv/(l[i j,k,1]+lv))*

```

```

(t-temp[i,j,k]);
toq:=(p[i,j,k]*1/(c[i,j,k,1]*ho*ho*ho))- (exp((-
10)/sec)*(p[i,j,k]*
1/(c[i,j,k,1]*ho*ho*ho)));
if (p[i,j,k]>0) then temp[i,j,k]:=temp[i,j,k]+toq;
if (p[i,j,k]=0) then temp[i,j,k]:=temp[i,j,k]+(tmx+tmy+tmz+tpx+tpy+tpz);

end;
end;
end;
end;

str(sec,s);
setfillstyle(1,3);
bar(250,430,470,470);
setcolor(14);outtextxy(250,450, 'Прошедшее время: '+s+' сек');
kuby;
vyvodtemp;
goto 1;
en;
closegraph;
end.

```

### Приложение 3

Таблица Теплофизические свойства материалов

Материал	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/мК	Теплоемкость $C$ , Дж/м <sup>3</sup> К
Воздух	0,026	1212
Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$
Стеклотекстолит	0,26	$1,810^6$
Сердечник трансформатора	58,7	$3,9 \cdot 10^6$
Обмотка трансформатора	390	$3,5 \cdot 10^6$
Радиатор (алюминий)	700	$1,510^6$
Транзистор	58,7	$3,9 \cdot 10^6$
Резистор	1,1	$1,84 \cdot 10^6$
Диод	58,7	$3,9 \cdot 10^6$

#### Список рекомендуемой литературы.

- 1 Дульнев Г. Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л.: Энергия, 1968
- 2 Дульнев Г. Н., Тарновский Н. Н. Тепловые режимы электронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1971
- 3 Роткоп Л. Л., Спокойный С. М. Расчёт тепловых режимов радиоэлектронных аппаратов при естественном воздушном охлаждении – Вопросы радиоэлектроники, 1972, вып.2, Сер.18.

Учебное издание

Составители: Галина Федоровна Краснощекова  
Владимир Анатольевич Зеленский

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ПОЛЕЙ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТРУКТУР РЭС

