

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТРУКТУР
ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ
(МЕТОД СЕТОК)

Утверждено
редакционно-издательским
советом института
в качестве
методических указаний
к лабораторной работе

УДК 621.396.6

В методических указаниях рассматривается численный (цифровой) метод моделирования температурных полей неупорядоченных структур РЭА, методика проведения эксперимента, алгоритм расчета на микро-ЭВМ "ДЗ-28".

Предназначены для студентов радиотехнического факультета специальности 0705.

Составитель асс.Г.Ф.Краснощекова

Рецензенты: к.т.н., доц. Ю.И.Макарычев, вед.инж.В.Н.Писарев

Ц е л ь р а б о т ы - изучение методики моделирования нестационарных и стационарных температурных полей неупорядоченных структур радиоэлектронных устройств (цифровое моделирование температурных полей).

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Одной из важнейших задач, поставленных перед разработчиками и конструкторами радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), 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 РЭА в различных условиях его эксплуатации;

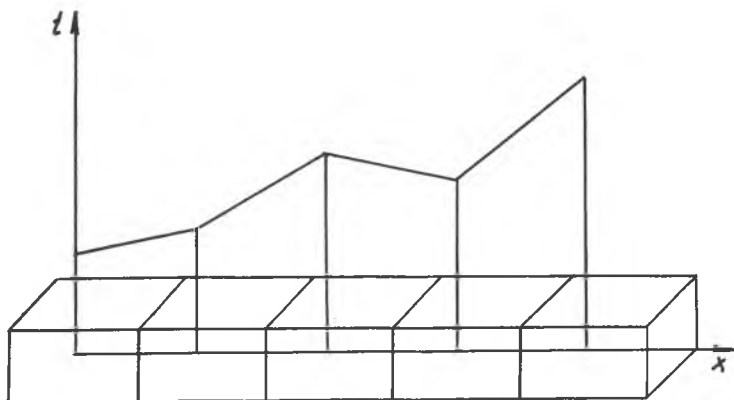
полную систему теплового проектирования.

Данная работа посвящена разработке физической модели температурного поля и методике ее расчета.

Среди конструкторов РЭА 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 мысленно 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 рис. I.

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



Р и с. 1. Кусочно-линейная аппроксимация температуры

заменяются на приращения в соответствующих точках. Например, уравнение теплопроводности изотропного тела в дифференциальной форме

$$\lambda \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v = c_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau}, \quad (I)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала;
 t - температура;
 q_v - удельная мощность выделения внутренних источников;
 c_p - теплоемкость тела при постоянном давлении;
 ρ - плотность;
 τ - время.

В конечных разностях это уравнение имеет вид

$$\lambda \left(\frac{\Delta \frac{\Delta t_x}{l_x}}{l_x} + \frac{\Delta \left(\frac{\Delta t_y}{l_y} \right)}{l_y} + \frac{\Delta \left(\frac{\Delta t_z}{l_z} \right)}{l_z} \right) + q_v = c_p \rho \frac{\Delta t_\tau}{\tau},$$

где l_x , l_y , l_z - приращения по координатам (рис.2), равные размерам элемента по этим координатам;

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

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

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

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

Величины с "+" относятся к входящим, а с "-" - к выходящим потокам тепла.

На рис.2 $J_x^+, J_x^-, J_y^+, J_y^-, J_z^+, J_z^-$,
плотности потоков по координатам x, y, z соответственно, а $\frac{\Delta t_c}{\Delta \tau}$ - изменение температуры в

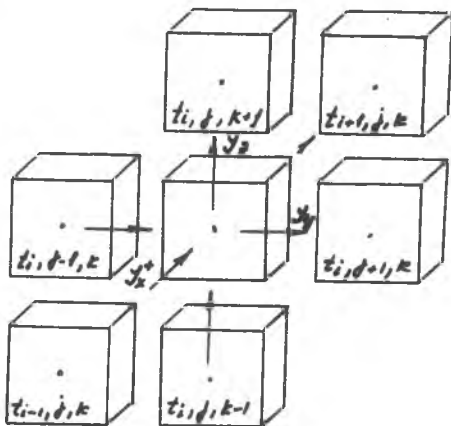
элементе с индексами i, j, k за момент времени $\Delta \tau$.

Данное уравнение легко решается от начального момента времени до интересующего времени работы устройства через равные кванты времени τ . Обычно за начальный момент времени берется момент включения

питания аппарата, в этот момент времени $\tau = 0$

температура в элементах

равна температуре окружающей среды t_c . Через момент времени τ определяется температура в узлах, где происходит выделение тепла, в остальных же она пока равна t_c . Так обходя все узлы по порядку, можно определить температуру в них в любой момент времени.

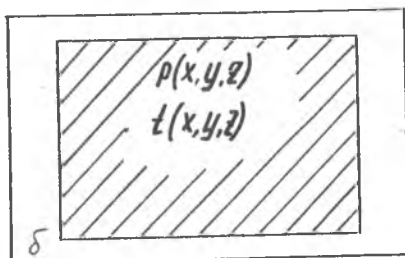
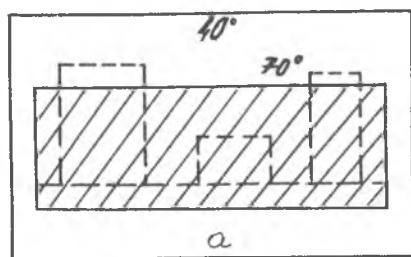


Р и с. 2. Распределение тепла в нескольких элементах

I.I. Анализ тепловых моделей РЭА

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 коли-

чественную 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 РЭА. На рис.3 схематично показаны тепловые модели первой и второй группы.



Р и с. 3. Виды тепловых моделей РЭА: а - тепловая модель I группы; б - тепловая модель II группы

Характерной особенностью моделей первой группы является разделение всех поверхностей модели РЭА 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 РЭА, представляющая собой неоднородную систему многих тел, идеализируется в виде однородного тела. Свойства этого тела характеризуются эффективными значениями теплофизических параметров - коэффициента теплопроводности $\lambda_{ЭАВ}$ и коэффициента теплоемкости $C_{ЭКВ}$. 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 точ-

ности 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

РЭА – 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 λ_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. Такое разбиение показано на рис.4.

Структура разбиения следующая:

V_1 – однородная структура с λ_1, C_1 ,

V_2 – однородная структура с λ_2, C_2 и т.д.

Значит, $V_0 = \sum V_i$.

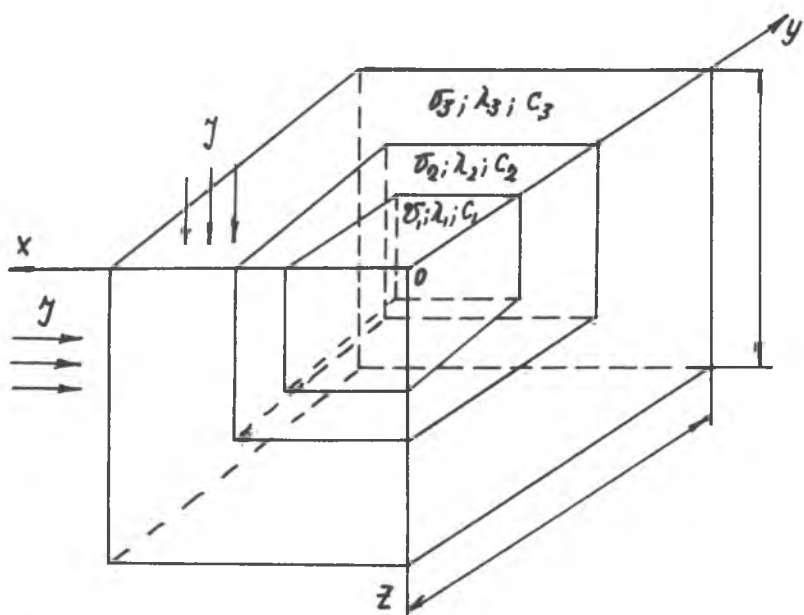
Линейные размеры $h_1; h_2; h_3, \dots, h_i$ определяются:

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

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

Из рис.4 следует, что элемент состоит из ряда столбиков, в которые входят слои однородных, но различных материалов, тогда основной параметр при расчете температурного поля – тепловое сопротивление – может быть определено:

$$R_{TOT} = \sum_{i=1}^n R_{сл} = \frac{1}{S_{i,сл}} \left(\frac{h_1}{\lambda_1} + \frac{h_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{h_n}{\lambda_n} \right) = \frac{A}{S_i}$$



Р и с. 4. Физическая модель элемента

$$S_{cl1} = h_1^2; \quad S_{cl2} = h_2(2h_1 + h_2)$$

.....

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

Для всего элемента с объемом V_0 тепловое сопротивление

$$R_{T\Sigma} = \int_0^h \frac{dh}{\lambda S} = \frac{1}{\lambda_{экв} h_{куб}}$$

Приравняв две величины $R_{Tот}$ и $R_{T\Sigma}$, можно найти осредненный теплофизический параметр $\lambda_{экв}$

$$\lambda_{экв} = \frac{(h_1^2 + h_2^2 + \dots + h_n^2) \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \dots \lambda_n}{h_{куб} (\lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n) h_1 \lambda_1 \lambda_3 \lambda_4 \dots \lambda_n h_2 + \dots},$$

или более общее выражение

$$\lambda_{экв} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i^2 \prod_{j=1}^n a_j}{h_{куб} \sum_{i=1}^n (h_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n a_j)} .$$

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

$$q_1 = C_1 V_1 \Delta t;$$

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

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 $C_{экв}$, то количество теплоты в нем q — не должно измениться, т.е.

$$q = C_{экв} V_0 \Delta t.$$

Таким образом, значение эквивалентной теплоемкости определяется выражением

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

1.3. Расчет температурного поля в модели второй группы

Вернемся к рис.2, только будет считать, что в каждом элементе уже найдены $\lambda_{экв}$ и $C_{экв}$ 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;
 τ - 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

$$R_{T\Sigma} = \frac{l_x}{2S} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{1}{\lambda_{x\text{эКВ}}^+} \right) = \frac{1}{2l} \left(\frac{\lambda_{\text{эКВ}} + \lambda_{x\text{эКВ}}^+}{\lambda_{\text{эКВ}} \lambda_{x\text{эКВ}}^+} \right).$$

Обозначим

$$K_{\text{оХЭКВ}}^+ = \frac{\lambda_{\text{эКВ}} \lambda_{x\text{эКВ}}^+}{\lambda_{\text{эКВ}} + \lambda_{x\text{эКВ}}^+}.$$

т.е.

$$J_x = 2l K_{\text{оХЭКВ}}^+ (t_x^+ - t_0).$$

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

$$\Delta t_{\text{оХ}}^+ = \frac{\Delta\tau J_x^+}{c_{\text{эКВ}}} = \frac{\Delta\tau}{c_{\text{эКВ}}} 2l [K_{\text{оХЭКВ}}^+ (t_x^+ - t_0)];$$

$$\Delta t_{\text{оХ}}^- = \frac{\Delta\tau J_x^-}{c_{\text{эКВ}}} = \frac{\Delta\tau}{c_{\text{эКВ}}} 2l [K_{\text{оХЭКВ}}^- (t_x^- - t_0)];$$

$$\Delta t_{\text{оУ}}^+ = \frac{\Delta\tau J_y^+}{c_{\text{эКВ}}} = \frac{\Delta\tau}{c_{\text{эКВ}}} 2l K_{\text{оУЭКВ}}^+ (t_y^+ - t_0);$$

$$\Delta t_{\text{оУ}}^- = \frac{\Delta\tau J_y^-}{c_{\text{эКВ}}} = \frac{\Delta\tau}{c_{\text{эКВ}}} 2l K_{\text{оУЭКВ}}^- (t_y^- - t_0);$$

$$t_{\text{оЗ}}^+ = \frac{\Delta\tau J_z^+}{c_{\text{эКВ}}} = \frac{\Delta\tau}{c_{\text{эКВ}}} 2l K_{\text{оЗЭКВ}}^+ (t_z^+ - t_0);$$

$$t_{\text{оЗ}}^- = \frac{\Delta\tau J_z^-}{c_{\text{эКВ}}} 2l K_{\text{оЗЭКВ}}^- (t_z^- - t_0).$$

при условии, что время ΔT много меньше постоянной времени ячейки

$$\Delta T \ll C_{0\text{эклв}} R_{T\Sigma} = \frac{C_{0\text{чл}} j V_0}{2 \ell K_{0x\text{эклв}}},$$

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

За время ΔT 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 Δt_{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

2.1. Описание блок-схемы программы

Методика расчета температурного поля, описанная выше, реализуется алгоритмом, блок-схема которого дана в прил. I.

В программе, реализующей данный алгоритм и написанной на языке БЭИСИК, используются следующие переменные:

D - длина модели;

B - ширина модели;

H - высота модели;

N_1 - число слоев разбиения по длине;

- N_2 - число слоев разбиения по ширине;
 N_3 - число слоев разбиения по высоте;
 M_1 - количество источников тепла;
 M_2 - число примененных в блоке материалов;
 N_1 - число элементов в конструкции;
 K_1, K_2, K_3 - число слоев тепловой модели по длине, ширине, высоте соответственно, с учетом слоев окружающей среды, примыкающей к конструкции;
 K_4 - число кубиков в конструкции, включая окружающую среду;
 V - объем элементарного кубика;
 A_1 - текущее время после включения аппаратуры;
 P_1 - произведение теплопроводностей всех материалов, находящихся в элементе (кубике);
 S_1 - сумма $\sqrt[3]{V_i^2}$, где V_i - объем, занимаемый i -м материалом в каждом элементе (кубике);
 S_2 - промежуточная сумма, используемая при вычислении эквивалентного коэффициента теплопроводности;
 $X(M_1)$ - массив координат X источников тепла;
 $Y(M_1)$ - массив координат Y источников тепла;
 $Z(M_1)$ - массив координат Z источников тепла;
 $P(M_1)$ - массив выделяемых мощностей источниками тепла;
 $C(M_4)$ - массив теплоемкостей, применяемых в конструкции материалов;
 $D_1(b)$ - массив приращения температуры с шести окружающих искомым элемент (кубик) соседних элементов (кубиков);
 $L_1(M_2)$ - массив теплопроводностей материалов, примененных в кубике;
 $V_1(M_2)$ - массив объемов, занимаемых каждым материалом, находящимся в элементе (кубике);
 A_2 - максимальный шаг по времени, который не приводит к неустойчивости вычислений;
 $T(K_4)$ - массив температур в каждом элементе (кубике);
 $Q(K_4)$ - массив удельных тепловыделений в элементе (кубике);
 $M(K_4)$ - массив теплопроводностей материалов, примененных в конструкции;
 $C3(K_4)$ - массив осредненных теплоемкостей элементов (кубиков);
 $L3(K_4)$ - массив осредненных теплопроводностей (кубиков);
 I, I_1, J_1 - параметры циклов;
 $K, J_2, C2$ - теплоемкость окружающей среды;

- L_2 - теплопроводность окружающей среды;
 N_5 - количество материалов в элементе (кубике);
 $C\phi$ - промежуточная теплоемкость i материала в кубике;
 E - номер рассматриваемого кубика;
 C_5 - минимальное отношение теплоемкости к теплопроводности в лобом из кубиков;
 A - время наблюдения, т.е. момент времени, в который нас интересует температурное поле конструкции;
 $T\phi$ - температура окружающей среды;
 $\Delta\phi$ - шаг по времени;
 $G_3; G_4;$ - промежуточные переменные, вынесенные за пределы цикла определения температуры в элементах (кубиках);
 G_5 - деления температуры в элементах (кубиках);
 $E_1, E_2, E_3, E_4, E_5,$ - номера соседних шести элементов с рассматриваемым E_6 кубиком с номером E .

Рассмотрим работу программы по этапам:

I. Ввод исходных данных. Отметим сразу, что некоторые данные для удобства вводятся в процессе вычислений. После ввода размеров модели и числа слоев разбиения по длине, ширине и высоте определяется число элементов (кубиков) собственно конструкции и модели, т.е. включая сюда еще окружающую среду вокруг конструкции. Далее вводятся координаты источников тепла. После вывода их на экран дисплея можно проверить правильность их ввода (практика работы с машиной показывает, что иногда случаются ошибки ввода координат). Если ввод прошел неправильно, то он повторяется, если верно, вводятся мощности источников тепла. Далее для удобства и сокращения на ввод данных заполняется таблица, где каждый материал, примененный в конструкции, нумеруется и вводятся его коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость. Далее вводятся тепловые параметры окружающей среды - λ и $C_{суд}$.

II. Определение осредненных теплофизических параметров каждого элемента (кубика). Для вычисления эквивалентной теплопроводности элемента и осредненной теплоемкости нужны данные об объемах, занимаемых каждым материалом, находящимся в кубике. Поэтому вычисления $\lambda_{экв}$ и $C_{экв}$ ведутся сразу после ввода V_i в каждом элементе (кубике). Рассчитанные $\lambda_{экв}$ и $C_{экв}$ выводятся на экран.

III. Присвоение начальных значений температур. После ввода времени наблюдения и температуры окружающей среды всем кубикам присваивается начальная температура, равная температуре окружающей среды.

IV. Определение максимального шага по времени. В программе предусмотрено введение желаемого шага. Если желаемый шаг оказался больше допустимого, то в дальнейших вычислениях используется расчетный, который и выводится на дисплей.

V. Определение тепловыделений в каждом элементе. Вычисляется по формуле, результаты выводятся на печать.

VI. Вычисление температур каждого элемента. Ведется по формулам, изложенным выше.

VII. Вывод результатов по слоям.

Далее, если текущее время итерации меньше времени наблюдения, то начинается следующая итерация, если нет, то можно или начать разбиение сначала, или увеличить время наблюдения.

2.2. Особенности программы

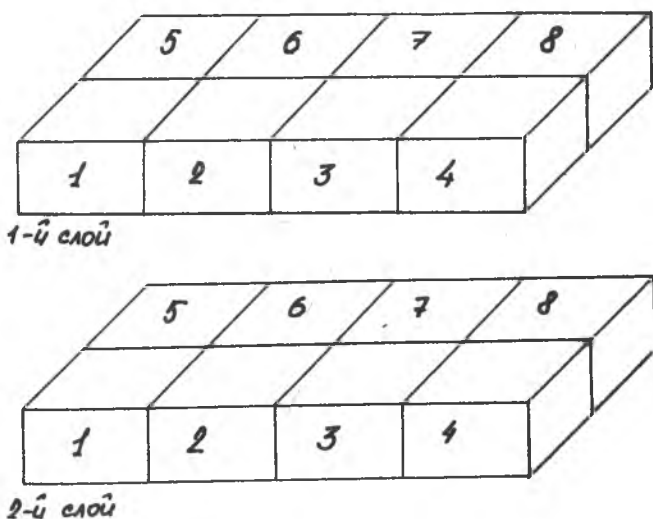
Расчет температурного поля РЭА является трехмерной задачей, поэтому и массивы температур, мощностей тепловыделения, всех теплофизических параметров и т.д. должны быть трехмерными. Но язык БЭИСИК не позволяет оперировать с трехмерными массивами, поэтому пришлось использовать одномерные массивы, а тепловую модель превратить из трехмерной (объемной) в одномерную и элементы нумеровать начиная с нижнего слоя и слева направо, как изображено на рис.5. Это привело к усложнению индексации и некоторому увеличению времени расчета, но на результат это никак не повлияло.

2.3. Подготовка исходных данных

Все исходные данные, используемые для расчетов, должны быть в системе СИ.

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

- длина, ширина, и высота конструкции, м;
- число слоев разбиения по длине, ширине и высоте;
- количество источников тепла;
- число используемых при конструировании материалов;
- координаты источников тепла X_i, Y_i, Z_i .



Р и с. 5. Нумерация элементов в разбиении

Координата кубика определяется 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:

мощность источников тепла в том же порядке, в котором вводились координаты. При этом надо учитывать, что если в один кубик попало сразу несколько источников, то они принимаются за один источник с мощностью, равной суммарной мощности;

теплоемкость примененных материалов и окружающей среды, Дж/м³·К. Заметим, что в таблицах обычно приводятся значения теплоемкости в Дж/кг·К; поэтому, чтобы получить необходимую размерность, надо табличное обозначение умножить на плотность этого вещества в кг/м³;

теплопроводность примененных материалов и окружающей среды, Вт/м·К;

количество материалов, их объем в каждом кубике, м³;

время наблюдения, с;

температура окружающей среды, °С;

желаемый шаг по времени.

2.4. Работа с программой

Этот параграф относится только к работе на микроЭВМ ЭЛЕКТРОНИКА ДЗ-28.

1. Включить процессор и дисплей.

2. Загрузить БЭЙСИК-ИНТЕРПРЕТАТОР, для чего вставить кассету с записью интерпретатора в ИМЛ ДЗ-28 и включать кнопки С и СЛ, пока все показания на индикаторе *X* не будут нулями и не загорится красная лампочка. Далее нажать кнопку КИ - на индикаторе должно загореться число - контрольная сумма. Если оно не совпадает с заданным, то нужно повторить загрузку нажатием кнопок С и СЛ.

Когда контрольная сумма совпадет с заданным числом, нужно нажать кнопку С и *S* и на пульте дисплея два раза ПС. После появления двоеточия можно приступить к следующему пункту.

3. Загрузить программу вычисления температурного поля. Для этого снять с ИМЛ кассету с интерпретатором и вставить туда кассету с программой и перемотать ленту в начало. На пульте дисплея набрать *LOAD*, ПС. После появления двоеточия, что говорит о загрузке программы, набрать *RUN*, ПС.

4. Далее производится ввод данных. Это делается с пульта дисплея после появления на экране сопровождающей вводимую величину расшифровки. Как уже говорилось выше, данные вводятся в системе СИ (роль запятой между целой частью и дробной играет точка). После ввода числа нужно нажать клавишу ПС.

5. Следует иметь в виду, что максимальное произведение числа слоев разбиения по длине, ширине и высоте, увеличенных на два (окружающая среда со всех сторон), равно 256.

Алгоритм расчета температурного поля численным методом дан в прил. I.

3. ЗАДАНИЕ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

В результате работы необходимо получить распределение температуры в заданном объекте при различном размещении тепловыделяющих элементов.

Расчитать температурное поле объекта исследования. Исходные данные получить у преподавателя. Исходя из конструктивных особенностей для расчета принять число слоев: по длине - 3, по ширине - 2, по высоте - 2. В расчете использовать следующие исходные данные:

объект исследования расположен в алюминиевой стойке;

температура окружающей среды - $+ 20^{\circ}\text{C}$;

число примененных в конструкции материалов - 5;

число источников тепла - 5, (пять диодов попали в один элемент, поэтому, согласно требованиям по подготовке исходных данных для работы с программой, были заменены одним источником с мощностью тепловыделения, равной суммарной мощности пяти диодов);

согласно вышеуказанному разбиению источникам присвоены следующие координаты, которые помещены в табл. I; в ней же преподавателем задаются мощности тепловыделения этими источниками;

Т а б л и ц а 1

Координаты и мощности источников тепловыделения

N_i	1	2	3	4	5	6	7
X_i	1	1	2	2	3	3	2
Y_i	2	1	2	1	2	1	2
Z_i	2	2	2	2	2	2	1
P_i							

исходные данные для расчета осредненных теплофизических параметров, входящих в каждый элемент разбиения, даны в табл.2;

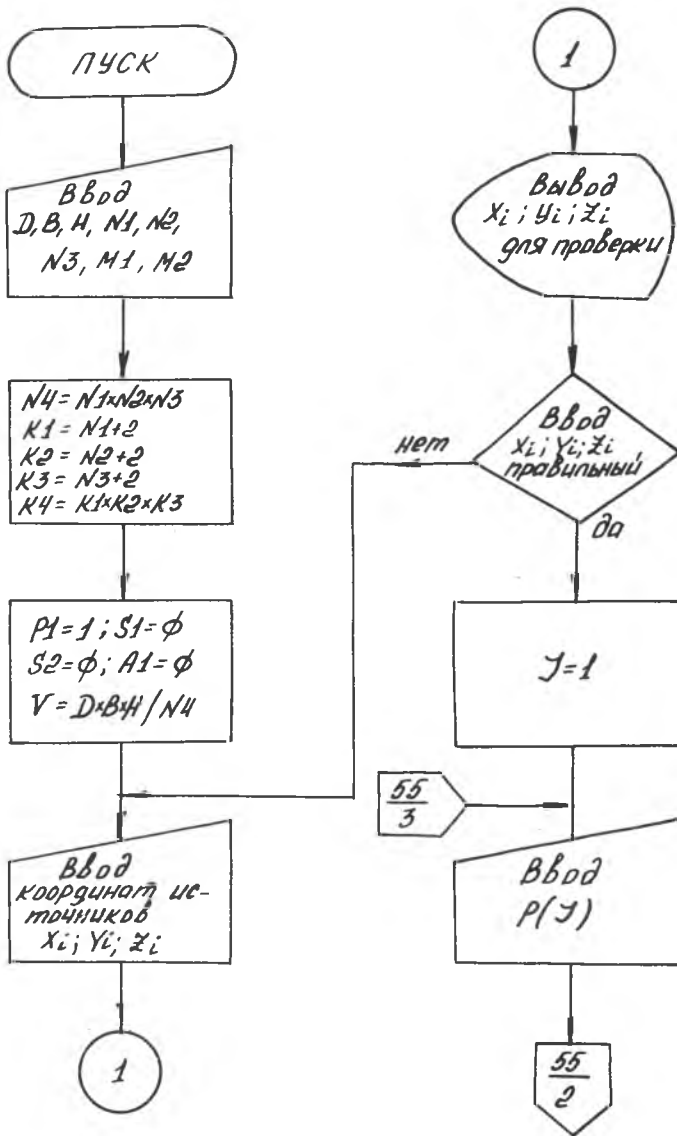
Т а б л и ц а 2

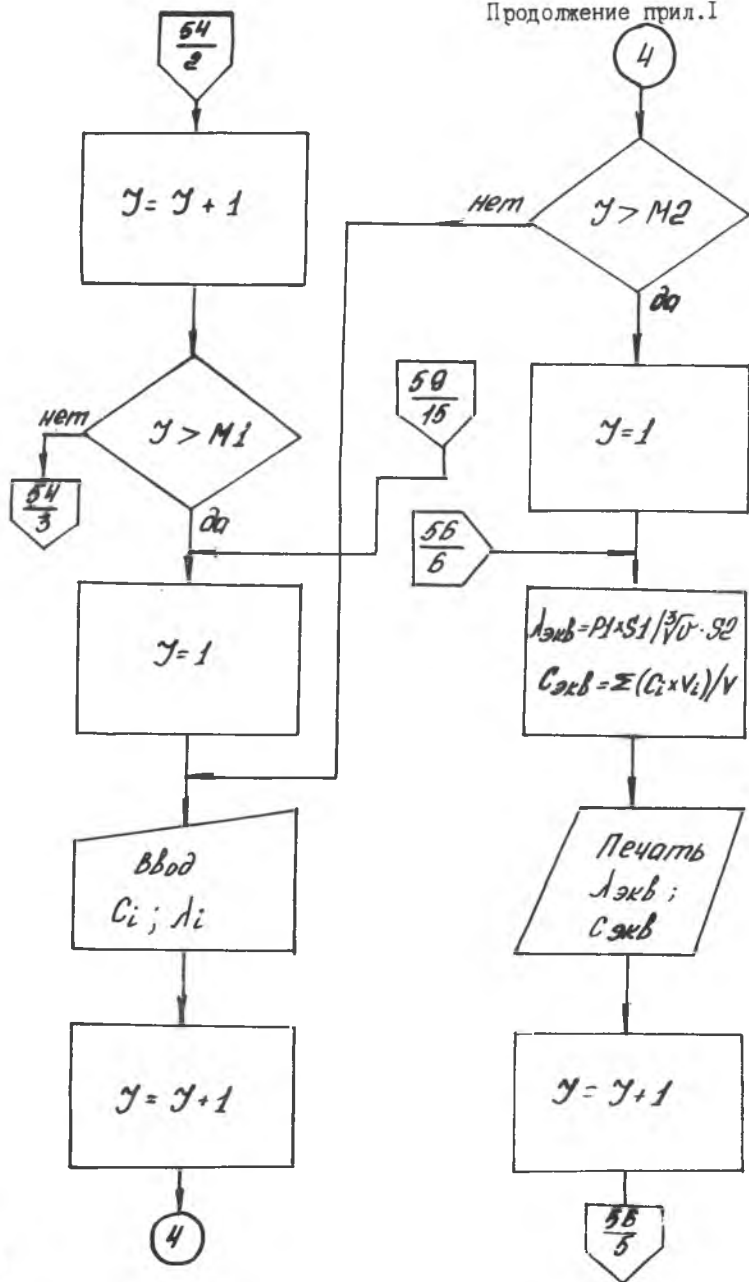
Состав элементов

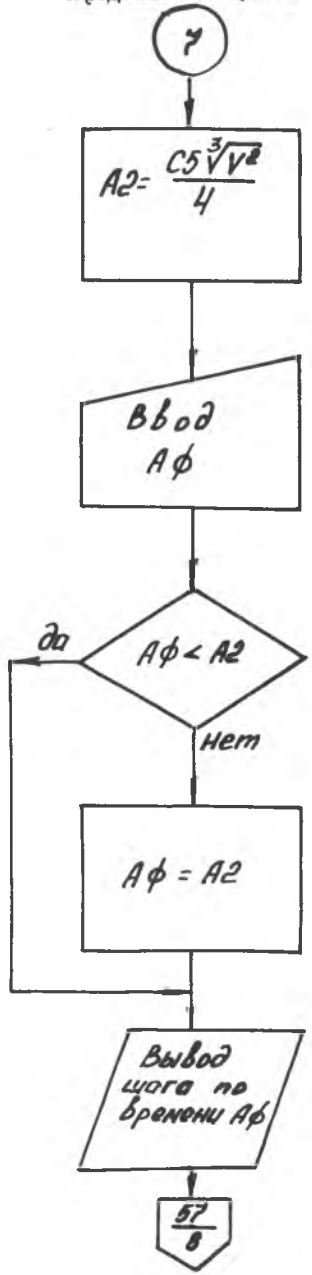
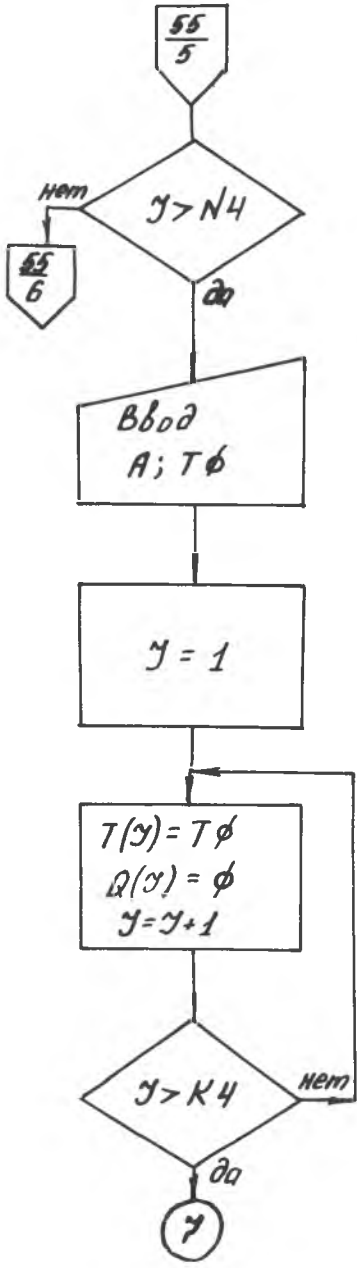
№ кубика	Элемент	Теплопроводность, λ , Вт/мК	Теплоемкость, Дж/м ³ К	Занимаемый объем, V_e , м ³
1	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
2	Компаунд часть модуля поз.2	0,6 0,05	$1,6 \cdot 10^6$ 1212	$1,06 \cdot 10^{-4}$ $1,4 \cdot 10^{-5}$
3	Компаунд часть модуля поз.2	0,6 0,05	$1,6 \cdot 10^6$ 1212	$1,2 \cdot 10^{-4}$ $6 \cdot 10^{-6}$
4	Компаунд часть модуля поз.2	0,6 0,05	$1,6 \cdot 10^6$ 1212	$1 \cdot 10^{-4}$ $2 \cdot 10^{-5}$

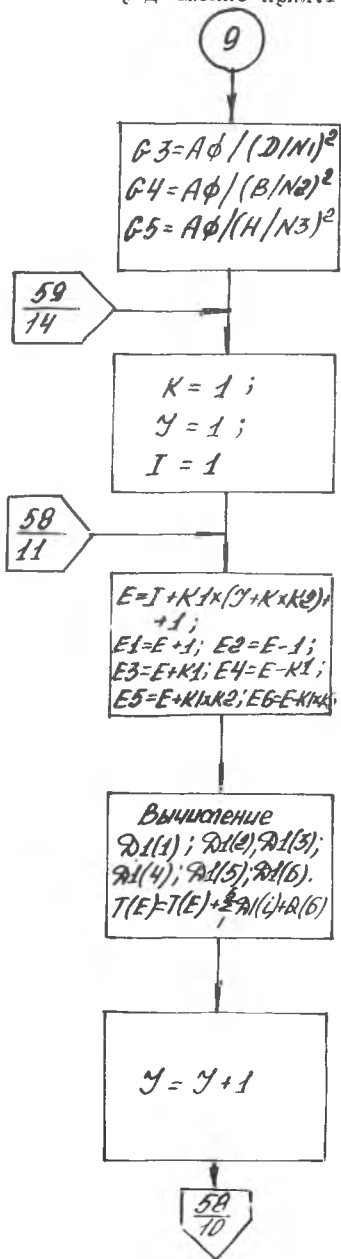
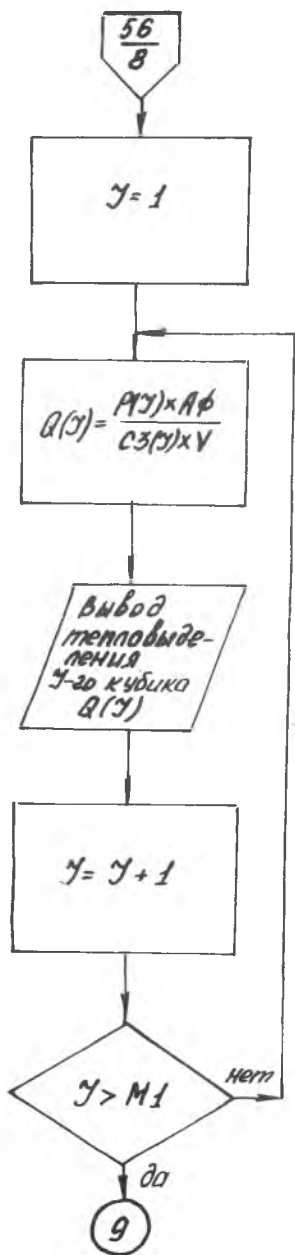
№ кубика	Элемент	Теплопроводность, Вт/мК	Теплоемкость, Дж/м ³ К	Занимаемый объем V_0 , м ³
5	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^{-5}$
	Часть модуля поз.2	0,05	1212	$4,7 \cdot 10^{-5}$
6	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-4}$
	Часть модуля поз.2	0,05	1212	$2 \cdot 10^{-5}$
7	Транзистор	58,7	$3,9 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^{-6}$
	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
8	Сердечник трансформатора	58,7	$3,9 \cdot 10^6$	$6,3 \cdot 10^{-6}$
	Обмотка трансформатора	390	$3,5 \cdot 10^6$	10^{-5}
	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$1,04 \cdot 10^{-4}$
9	Диоды	58,7	$3,9 \cdot 10^6$	$7 \cdot 10^{-6}$
	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$1,13 \cdot 10^{-4}$
10	Транзистор	58,7	$3,9 \cdot 10^6$	$8,7 \cdot 10^{-6}$
	Резистор	210	$2,4 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^{-5}$
	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$6,43 \cdot 10^{-5}$
11	Часть радиатора	210	$2,4 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{-5}$
	Резистор	1,1	$1,84 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^{-6}$
	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
12	Сердечник Т1	58,7	$3,9 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
	Обмотка Т1	390	$3,5 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
	Компаунд	0,6	$1,6 \cdot 10^6$	$4,8 \cdot 10^{-5}$

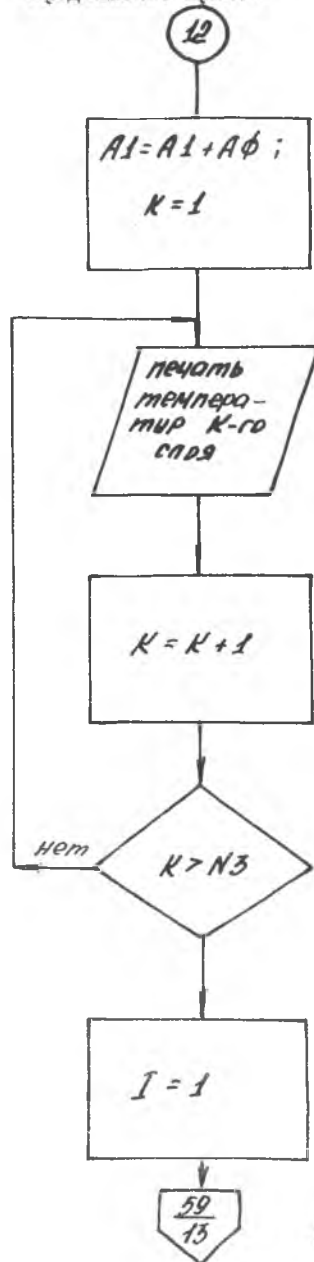
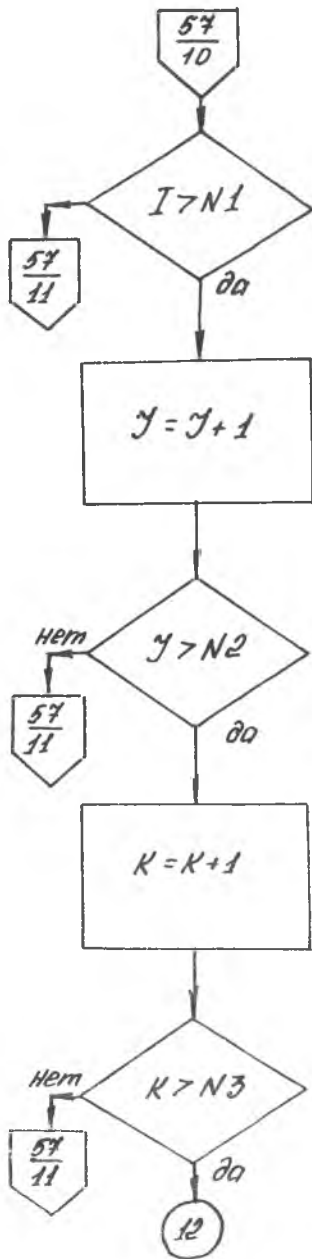
Алгоритм расчета

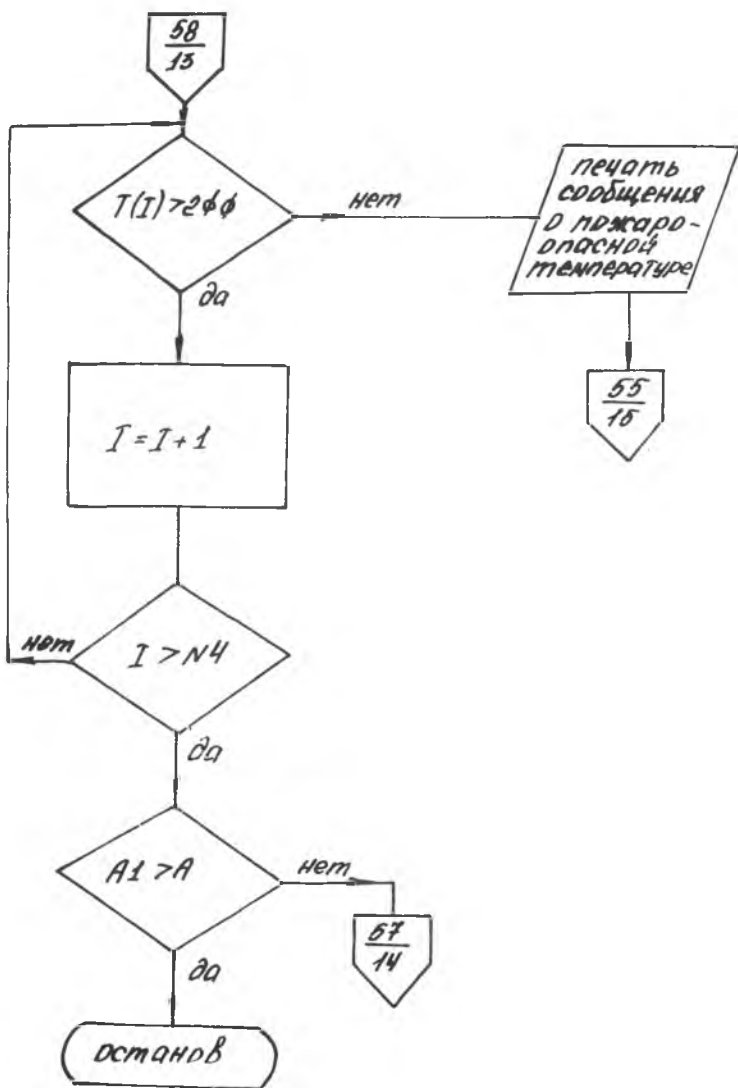












4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель и краткое содержание работы.
2. Описание лабораторной установки с описанием приборов.
3. Расчет на ЭВМ осредненных теплофизических коэффициентов и температурного поля предложенной модели.
4. Графики, таблицы.
5. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Какие функции может выполнять подсистема "Тепловые режимы" в САПР?
2. В чем суть цифрового моделирования температурных полей?
3. Запишите дифференциальное уравнение теплопроводности в разностной и дифференциальной формах.
4. Как происходит распределение тепла в исследуемых элементах?
5. Чем отличаются друг от друга реальная конструкция и ее модель?
6. Какие виды тепловых моделей вы знаете. Их характеристики?
7. Почему необходимо рассчитывать осредненные теплофизические параметры $\lambda_{эжв}; C_{эжв}$ при расчете температурных полей II группы?
8. Какова методика расчета $\lambda_{эжв}$?
9. Как работает алгоритм расчета?
10. Какие достоинства цифрового моделирования?
11. Какие недостатки данного метода моделирования полей?

Библиографический список

- I. Маквцов Е.Н. Модели из кубиков. -М.:Сов.радио, 1978, с.3-86.

Составитель Галина Федоровна Краснощекова

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СТРУКТУР
ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ
(Метод сеток)

Редактор Е.Г.Филиппова
Техн.редактор Н.М.Каленюк
Корректор Е.Г.Филиппова

Подписано в печать 14.04.87. Формат 60x84 1/16.
Бумага оберточная белая. Печать оперативная.
Усл.п.л. 1,4. Уч.-изд.л. 1,3. Т.300 экз.
Заказ 3620 Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева, г.Куйбышев, ул.Моло-
догвардейская, 151.

Куйбышевское полиграфическое объединение, г. Куйбышев, ул. Венцека, 60