

su 8201304

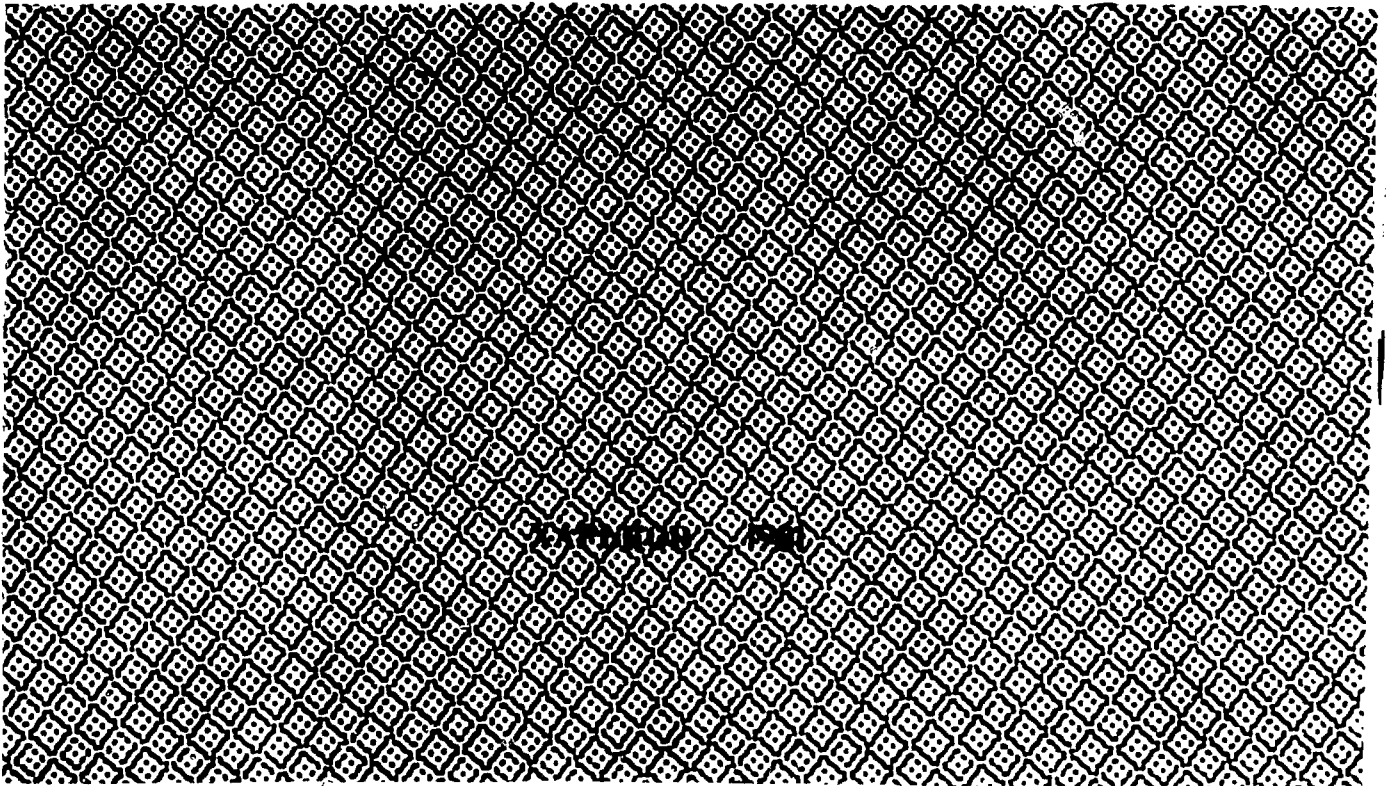
ХФТИ 81-33



ХАРЬКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА  
И ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН УССР

М.А.Хажмурадов, А.А.Иванов

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА  
ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КАССЕТЫ  
С ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ



УДК 538.24

Хажмурадов М.А., Иванов А.А.

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ КАССЕТЫ С ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ.

Препринт ХФТИ АН УССР, ХФТИ 81-33, Харьков, 1981, с. II.

Рассматривается решение краевой задачи стационарной теплопроводности с внешним граничным условием третьего рода и условиями сопряжения тепловыделяющего элемента (ТВЭ) средой, заполняющей кассету, соответствующим неплотному тепловому контакту. Области ТВЭ и кассеты могут иметь неклассическую форму. Указан способ преобразования соответствующей неоднородной краевой задачи к задаче с однородными граничными условиями. Сформулирован вариационный принцип решения краевой задачи. Разработан (на основе применения структурного метода) способ построения конечномерного пространства, аппроксимирующего пространство допустимых функций эквивалентной вариационной задачи. Аппроксимации компонент решения краевой задачи представляются разложениями по базисным функциям, точно удовлетворяющим как внешним, так и внутренним граничным условиям.

Практическая апробация разработанной в работе методики осуществлена на решении конкретной задачи стационарной теплопроводности. Численная реализация осуществлена на языке ПЛ-1. (2 ил., 1 табл., список лит. - 4 назв.).

© Харьковский физико-технический институт (ХФТИ), 1981.

Задачи стационарной теплопроводности с внутренними границами раздела неоднородных сред возникают при анализе тепловых полей систем различного назначения (в реакторах с распределенными по объему источниками энергии, охлаждаемые жидкими или газовыми теплоносителями, конструкциях с многослойными покрытиями и др.).

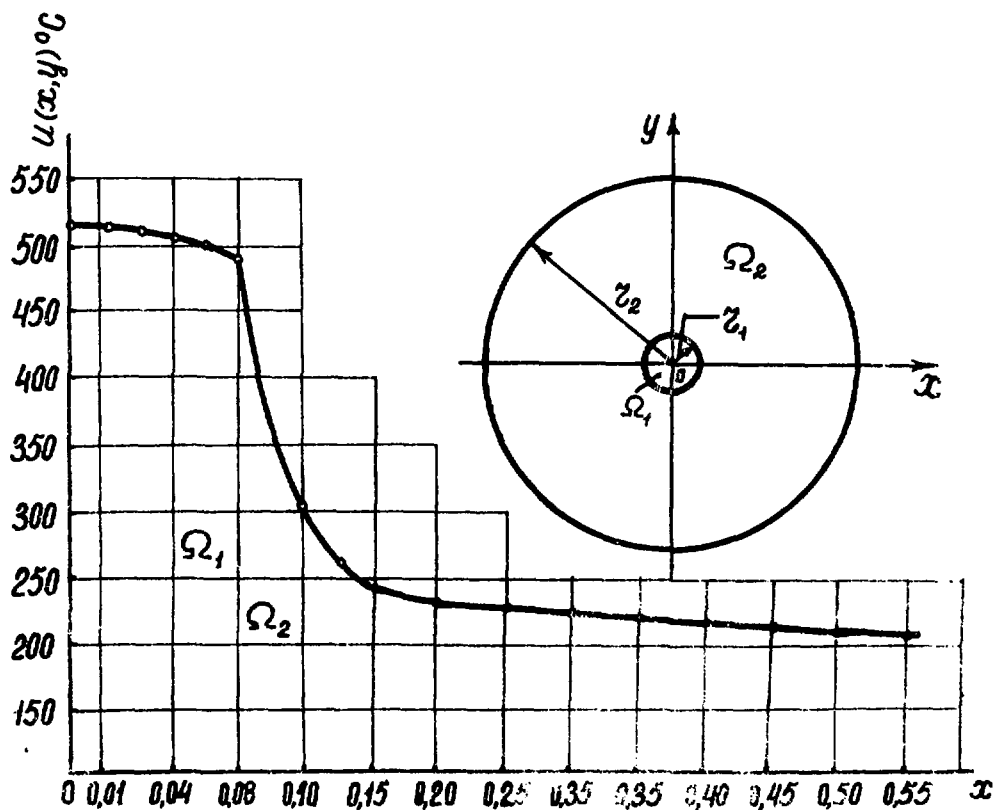


Рис. I. Стационарное распределение температуры в областях  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  при  $y=0$

В общей постановке задача формулируется следующим образом.

Рассматривается область  $\Omega_2 \{(x, y) \in \Omega_2\}$  с внутренним тепловыделяющим элементом (ТВЭ)  $\Omega_1 \{(x, y) \in \Omega_1\}$  (рис. I). Предполагается следующее:

1) коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи среды, заполняющей область  $\Omega_2$ , характеризуются функциями  $\lambda_2(x, y), \alpha_2(x, y)$  соответственно;

2) коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи материала ТВЭ характеризуются функциями  $\lambda_1(x, y), \alpha_1(x, y)$  соответственно;

3) коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи материала защитного покрытия (оболочки) ТВЭ характеризуются функциями  $\lambda_3(x, y), \alpha_3(x, y)$ ;

4) коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи материала кассеты характеризуются функциями  $\lambda_4(x, y), \alpha_4(x, y)$ ;

5) на границе  $\Gamma_1$  раздела сред  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  выполняются условия неплотного теплового контакта [I]:

$$\lambda_3 \frac{\partial u_1}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1} = \lambda_2 \frac{\partial u_2}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1}; \quad (1)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial u_1}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_3 (u_1 - u_2); \quad (2)$$

6) на границе  $\Gamma_2$  области  $\Omega_2$  задано условие конвективного теплообмена

$$\lambda_4 \frac{\partial u_2}{\partial \nu_2} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_4 (u_2 - u_c); \quad (3)$$

7) удельная мощность тепловыделения ТВЭ задается функцией  $f(x, y)$  ( $f(x, y) = Q / \nu c \rho$ ,  $Q$  - мощность тепловыделения ТВЭ,  $\nu$  - объем ТВЭ).

Требуется определить  $u_1(x, y), u_2(x, y)$ , представляющие стационарные распределения температур в областях  $\Omega_1, \Omega_2$  при указанных выше условиях.

Математическая формулировка поставленной выше задачи представляется системой уравнений:

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) = -f(x, y) \quad \forall (x, y) \in \Omega_1, \quad (4)$$

$$\lambda_2 \left( \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \right) = 0 \quad \forall (x, y) \in \Omega_2 \quad (5)$$

с граничными условиями (I) - (3).

Наличие в системе уравнений краевой задачи теплопроводности условий сопряжения создает дополнительные трудности при ее решении. Эти трудности приобретают принципиальный характер в случае, когда решение краевой задачи отыскивается в составной области со сложной формой внешних или внутренних границ. В настоящее время эффективными методами решения задач стационарной теплопроводности с условиями сопряжения являются конечно-разностные и вариационные методы [2].

Следует отметить, что применение конечно-разностного метода к решению задач указанного типа в случае границ, не совпадающих с линиями сетки, связано со значительными трудностями, обусловленными как трудностью получения дополнительных конечно-разностных уравнений, так и сложностью организаций реального их вычислительного процесса.

Основная трудность, которую встречает практическое применение вариационных методов к решению краевых задач с условиями сопряжения, заключается в построении координатных (базисных) систем функций, удовлетворяющих заданной системе граничных условий.

В рамках энергетического метода указанную трудность удается частично обойти, используя процедуру, основанную на выборе системы координатных функций, удовлетворяющих только главным граничным условиям [3]. В нашем случае к этим условиям относятся условия третьего рода, заданные на внешней и внутренней границах области интегрирования.

Следует отметить, что использование такой "упрощенной" координатной системы приводит к существенному упрощению вычислительной процедуры энергетического метода, однако, сходимость

получаемых при этом приближенных решений краевых задач оказывается, как правило, довольно медленной. С другой стороны, использование аппроксимирующих функций, точно учитывающих условия сопряжения, резко ускоряет сходимость приближенных решений краевых задач; в некоторых случаях можно получить ту же скорость сходимости, что и для задач с гладкими коэффициентами.

Практика применения энергетического метода в сочетании со структурным методом [4] к решению задач стационарной теплопроводности с внутренними границами показывает, что использование координатных систем функций, удовлетворяющих полной системе граничных условий (I)–(3), позволяет сделать их практически разрешимыми при таких, например, сложных условиях, как наличие областей со сложной формой внешних и внутренних границ, разрывных граничных условий, неоднородных сред с резко различающимися физическими константами и др.

Кроме того, во многих практически важных случаях представляет интерес возможно более точный анализ структуры температурных полей именно в окрестностях границ их сопряжения.

В связи с отмеченными выше обстоятельствами, представляется целесообразным разработать методику построения координатных систем функций, удовлетворяющих полным системам граничных условий (I)–(3). Основным результатом настоящей работы и является развитие такой методики применительно к решению краевой задачи стационарной теплопроводности с внутренней границей раздела неоднородных сред.

Преобразуем краевую задачу (I)–(5) к задаче с однородными граничными условиями. Положим  $\theta_1 = u_1 - u_c$ ,  $\theta_2 = u_2 - u_c$ , где  $\theta_i$  ( $i=1,2$ ) – новая неизвестная функция;  $u_c$  – некоторая функция, удовлетворяющая краевым условиям

$$\lambda_1 \left( \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial y^2} \right) = -f(x, y), (x, y) \in \Omega_1; \quad (6)$$

$$\lambda_2 \left( \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial y^2} \right) = 0, (x, y) \in \Omega_2, \quad (7)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial \theta_1}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1} = \lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1}; \quad (8)$$

$$\lambda_3 \frac{\partial \theta_1}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1} = \alpha_3 (\theta_1 - \theta_2); \quad (9)$$

$$\lambda_4 \frac{\partial \theta_2}{\partial \nu_2} \Big|_{\Gamma_2} = \alpha_4 \theta_2. \quad (10)$$

В соответствии с вариационным принципом краевая задача (6)–(10) эквивалентна вариационной задаче об отыскании функции, обеспечивающей минимум функционалу

$$\begin{aligned} J(\theta_1, \theta_2) = & \int_{\Omega_1} [\lambda_1 (\nabla \theta_1)^2 - 2\theta_1 f] d\Omega_1 + \\ & + \int_{\Omega_2} \lambda_2 (\nabla \theta_2)^2 d\Omega_2 + \alpha_3 \int_{\Gamma_1} (\theta_1 - \theta_2)^2 d\Gamma_1 + \alpha_4 \int_{\Gamma_2} \theta_2^2 d\Gamma_2. \end{aligned} \quad (II)$$

Элементы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ , минимизирующие функционал (II), представим структурными формулами:

$$\theta_1(x, y) = (2 + h_1 \omega_1) \Phi_0 - \omega_1 D_1 \Phi_0; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \theta_2(x, y) = & (1 + h_2 c) \Phi_0 + \tau [(h_3 - 1) D_1 \Phi_0 - h_4 D_1 (d \times D_1 \Phi_0) + \\ & + h_6 \Phi_0] + h_4 d D_1 \Phi_0 + h_5 \beta D_2 \Phi_0 - h_5 c D_2 (\beta D_2 \Phi_0), \end{aligned} \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} h_1 = \alpha_3 / \lambda_3; \quad h_2 = \alpha_4 / \lambda_4; \quad h_3 = \lambda_3 / \lambda_4; \quad h_4 = \lambda_3 / \alpha_3; \\ h_5 = \lambda_4 / \alpha_4; \quad h_6 = \alpha_3 / \lambda_4; \quad c = \frac{\omega_1^2 \omega_2}{\omega_1^2 + \omega_2}; \\ d = \frac{\omega_2^2}{\omega_1 + \omega_2^2}; \quad \beta = \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 + \omega_2}; \quad \tau = \frac{\omega_1 \omega_2^2}{\omega_1 + \omega_2^2}; \end{aligned}$$

$\omega_1$ ,  $\omega_2$  – нормализованные уравнения границы  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  области  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  соответственно [4].

Функции  $\omega_s$  ( $s=1, 2$ ) строятся с помощью метода аналитического описания сложных геометрических объектов и удовлетворяют условиям

$$\left. \begin{array}{l} 1) \omega_s(x, y) \in C^2(\Omega_s); \quad 2) \omega_s(x, y) = 0 \quad (x, y) \in \Gamma_s; \\ 3) \frac{\partial \omega_s(x, y)}{\partial \nu_s} = 1 \quad (x, y) \in \Gamma_s; \quad 4) \omega_1(x, y) > 0 \quad (x, y) \in \Omega_1; \\ 5) \omega_2(x, y) > 0 \quad (x, y) \in \Omega / \Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2. \end{array} \right\} (14')$$

Для построения функций  $\omega_s(x, y)$ , обладающих свойствами 1)–5), достаточно располагать уравнениями границ  $\Gamma_1, \Gamma_2$ .

$D$  – линейно-дифференциальный оператор, определяемый формулой [4]

$$D \equiv \frac{\partial \omega_s}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial \omega_s}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y}, \quad (15)$$

удовлетворяющий условию

$$D_1 \Phi_0|_{\Gamma_1} = \frac{\partial \Phi_0}{\partial \nu_1}|_{\Gamma_1}, \quad D_2 \Phi_0|_{\Gamma_2} = \frac{\partial \Phi_0}{\partial \nu_2}|_{\Gamma_2}, \quad \Phi_0(x, y) \in L_2(\Omega) \quad (16)$$

Условие (16) следует из свойств 2) и 3) функции  $\omega_s(x, y)$ .

Доказательство о том, что компоненты  $\theta_1(x, y), \theta_2(x, y)$ , определенные структурными формулами (12), (13), точно удовлетворяют заданной системе граничных условий (8), (10) независимо от выбора функции  $\Phi_0(x, y)$ , осуществляется путем непосредственной проверки

$$a) \quad \lambda_3 \frac{\partial \theta_1}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1} = \lambda_3 D_1 \theta_1 \Big|_{\Gamma_1} = (\alpha_3 \Phi_0 + \lambda_3 D_1 \Phi_0) \Big|_{\Gamma_1};$$

$$б) \quad \alpha_3 (\theta_1 - \theta_2) \Big|_{\Gamma_2} = (\alpha_3 \Phi_0 + \lambda_3 D_1 \Phi_0) \Big|_{\Gamma_1};$$

$$в) \quad \lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial \nu_1} \Big|_{\Gamma_1} = \lambda_2 D_2 \theta_2 \Big|_{\Gamma_1} = (\alpha_3 \Phi_0 + \lambda_3 D_1 \Phi_0) \Big|_{\Gamma_1};$$

$$г) \quad \lambda_4 \frac{\partial \theta_2}{\partial \nu_2} \Big|_{\Gamma_2} = \lambda_4 D_2 \theta_2 \Big|_{\Gamma_2} = (\alpha_4 \Phi_0 + \lambda_4 D_2 \Phi_0) \Big|_{\Gamma_2};$$

$$д) \quad \alpha_4 \theta_2 \Big|_{\Gamma_2} = (\alpha_4 \Phi_0 + \lambda_4 D_2 \Phi_0) \Big|_{\Gamma_2}.$$



Условия а)-д) следуют из свойств  $\omega_s(x, y)$  (I4).

Представляя определенную компоненту  $\Phi_0(x, y)$  структурных формул (I2)-(I3) разложением [5]

$$\Phi_0(x, y) = \sum_{i=1}^n C_i \varphi_i(x, y) \quad (I7)$$

по функциям заранее выбранной полной системы функций

$\{\varphi_i(x, y)\}_{i=1}^n$  (полиномы Лежандра, Чебышева, тригонометрические или степенные функции и др.), получаем

$$\theta_1(x, y) = \sum_{i=1}^n C_i \Psi_i^{(1)}(x, y); \quad (I8)$$

$$\theta_2(x, y) = \sum_{i=1}^n C_i \Psi_i^{(2)}(x, y), \quad (I9)$$

где

$\{\Psi_i^{(1)}, \Psi_i^{(2)}\}_{i=1}^n$  - элементы базисных систем функций.

$$\{\Psi_i^{(1)}(x, y)\}_{i=1}^n = (2 + h_1 \omega_1) \Psi_i - \omega_1 D_1 \Psi_i, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \{\Psi_i^{(2)}(x, y)\}_{i=1}^n = & (1 + h_2 c) \Psi_i + \tau [(h_3 - 1) D_1 \Psi_i - h_4 D_1 (d D_1 \Psi_i + \\ & + h_6 \Psi_i)] + h_4 d D_1 \Psi_i + h_5 b D_2 \Psi_i - h_5 c D_2 (b D_2 \Psi_i), \end{aligned} \quad (21)$$

$C_i (i = 1, 2, \dots, n)$  - неизвестные коэффициенты, которые определяются из условия минимума функционала (II), т.е. из условия

$$\frac{\partial J(\theta_1, \theta_2)}{\partial C_j} = 0 \quad (1 \leq j \leq n). \quad (22)$$

Условие (22) эквивалентно системе линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{i=1}^n A_{ij} C_i = B_j \quad (1 \leq j \leq n); \quad (23)$$

$$\begin{aligned} A_{ij} = & \sum_{m=1}^2 \lambda_m \int \nabla \Psi_i^{(m)} \nabla \Psi_j^{(m)} d\Omega + \alpha_1 \int (\Psi_i^{(1)} - \Psi_i^{(2)}) \times \\ & \times (\Psi_j^{(1)} - \Psi_j^{(2)}) d\Omega_1 + \alpha_2 \int_{\Omega_2} \Psi_i^{(2)} \Psi_j^{(2)} d\Omega_2; \end{aligned} \quad (24)$$

$$B_i = f_1 \int_{\Omega_1} \Psi_i^{(1)} d\Omega_1. \quad (25)$$

Таким образом, приближенное аналитическое решение краевой задачи (6)-(10), полученное с помощью вариационно-структурного метода, представляется в виде

$$u_1(x, y) = \varphi_0^{(1)}(x, y) + \theta_1(x, y) \quad (x, y) \in \Omega_1; \quad (26)$$

$$u_2(x, y) = \varphi_0^{(2)}(x, y) + \theta_2(x, y) \quad (x, y) \in \Omega_2, \quad (27)$$

где  $\varphi_0^{(1)}, \varphi_0^{(2)}$  - продолженные внутрь области  $\omega_s(x, y)$  ( $s=1,2$ ) значения граничных условий  $u_c$ . Неизвестные постоянные  $C_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ), входящие в (18) и (19), определяются в результате решения системы уравнений (23).

Иллюстрацией применения предложенной методики является решение краевой задачи при следующих параметрах:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0,16 \text{ см}; & \alpha_3 &= 7 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}; \\ \tau_2 &= 0,56 \text{ см}; & \alpha_4 &= 5 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{град}; \\ \lambda_1 = \lambda_3 &= 5 \text{ Вт/см} \cdot \text{град}; & u_c &= 100 \text{ град}; \\ \lambda_2 = \lambda_4 &= 3 \text{ Вт/см} \cdot \text{град}; & f_1 &= 10^5 \text{ Вт/см}^3. \end{aligned}$$

Матрицы  $A_{ij}$  (24) и  $B_i$  (25) имеют вид

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \lambda_1 \iint_{\Omega_1} \left[ \frac{\partial \Psi_i^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \Psi_j^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_i^{(1)}}{\partial y} \frac{\partial \Psi_j^{(1)}}{\partial y} \right] d\Omega_1 + \\ &+ \lambda_2 \iint_{\Omega_2} \left[ \frac{\partial \Psi_i^{(2)}}{\partial x} \frac{\partial \Psi_j^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial \Psi_i^{(2)}}{\partial y} \frac{\partial \Psi_j^{(2)}}{\partial y} \right] d\Omega_2 + \\ &+ \alpha_1 \int_{\Gamma} (\Psi_i^{(1)} - \Psi_i^{(2)}) (\Psi_j^{(1)} - \Psi_j^{(2)}) d\Gamma_1 + \alpha_2 \int_{\Gamma_2} \Psi_i^{(2)} \Psi_j^{(2)} d\Gamma_2; \end{aligned} \quad (28)$$

$$B_i = f_1 \iint_{\Omega_2} \Psi_i^{(1)} d\Omega_1. \quad (29)$$

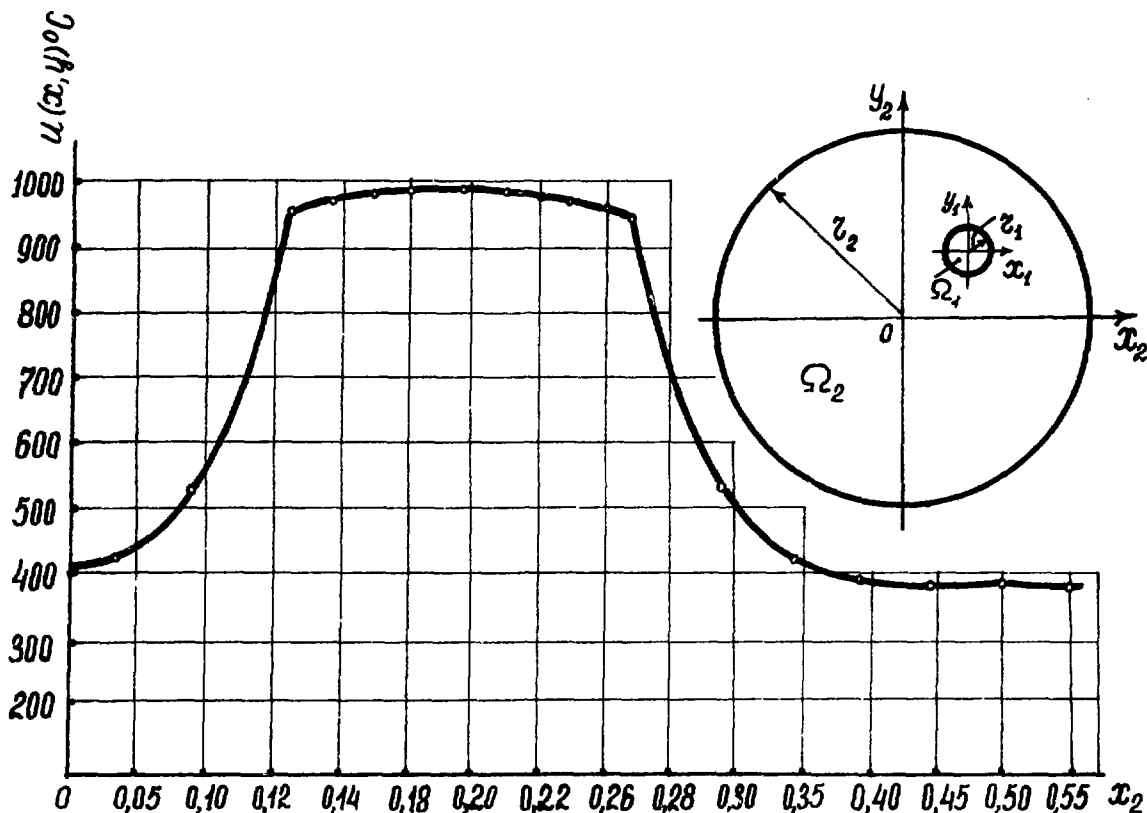


Рис. 2. Стационарное распределение температуры в областях  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  при  $y_2 = y_1 = 0,195$

Коэффициенты  $C_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), определенные из решения системы линейных уравнений вида

$$\sum_{i=1}^n A_{ij} C_i = B_j, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

для задачи представленной на рис. 2, приведены ниже.

$$\begin{array}{lll}
 C_1 = 3,903077 \cdot 10^2; & C_2 = -1,028435 \cdot 10^1; & C_3 = -1,028435 \cdot 10^1; \\
 C_4 = -3,674682 \cdot 10^1; & C_5 = 1,794675 \cdot 10^1; & C_6 = -3,674675 \cdot 10^1; \\
 C_7 = -1,448524 \cdot 10^1; & C_8 = -1,620817 \cdot 10^1; & C_9 = -1,620817 \cdot 10^1; \\
 C_{10} = -1,448511 \cdot 10^1; & C_{11} = 7,387216 \cdot 10^1; & C_{12} = -3,852694 \cdot 10^1; \\
 C_{13} = 7,490201 \cdot 10^1; & C_{14} = -3,852694 \cdot 10^1; & C_{15} = -7,387216 \cdot 10^1; \\
 C_{16} = -3,877901 \cdot 10^1; & C_{17} = -1,632713 \cdot 10^1; & C_{18} = -2,205042 \cdot 10^1; \\
 C_{19} = -2,205042 \cdot 10^1; & C_{20} = -1,632713 \cdot 10^1; & C_{21} = -3,877929 \cdot 10^1.
 \end{array}$$

Для аппроксимации стационарных температурных полей  $\theta_1(x, y)$ ,  $\theta_2(x, y)$  в областях  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  используется полином Чебышева пятой степени

$$\{\varphi_i(x, y)\}_{i=1}^n = \left\{1, x, y, x^2 - \frac{1}{2}, xy, y^2 - \frac{1}{2}, \dots\right\}_{i=1}^n,$$

$n$  - число координатных функций, для двухмерной области определяется по формуле

$$n = \frac{(n_1 + 1)(n_1 + 2)}{2},$$

где  $n_1$  - степень полинома.

В общем случае  $\varphi_i^{(1)}$  и  $\varphi_i^{(2)}$  могут быть разные, например,  $\varphi_i^{(1)}$  - степенные функции или полином Чебышева, Эрмита и др. [6],  $\varphi_i^{(2)}$  - тригонометрические функции, полином Эрмита, Чебышева и т.д.

Функции  $\omega_s$  ( $s=1, 2$ ), входящие в выражение (20), принимают следующий вид:

$$\omega_1(x, y) = \frac{\tau_1^2 - (x - x_1)^2 - (y - y_1)^2}{2\tau_1};$$

$$\omega_2(x, y) = \frac{\tau_2^2 - (x - x_2)^2 - (y - y_2)^2}{2\tau_2},$$

$\tau_1, \tau_2$  - радиусы областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  соответственно.

На рис. 1 и 2 приведены результаты приближенного аналитического решения

$$u_1(x, y) = u_c + \theta_1(x, y); \quad u_2(x, y) = u_c + \theta_2(x, y)$$

краевой задачи (6)-(10). Численная реализация осуществлялась на языке ПЛ-I. Время счета на ЭВМ ЕС-1022 не превышает для каждой из приведенных вариантов задач 15 минут.

## ПРИКНИЖНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности. М.: Мир, 1960.
2. Стринг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977.
3. Обен Ж.-П. Приближенное решение эллиптических краевых задач. М.: Мир, 1977.
4. Рвачев В.Л. Методы алгебры логики в математической физике. Киев: Наукова думка, 1974.
5. Михлин С.Г. Вариационные методы в математической физике. М.: Наука, 1970.
6. Арфкен Г. Математические методы в физике. М.: Атомиздат, 1970.



Манал Ахмадович Хаммурадов, Анатолий Анатольевич Иванов

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО ПОЛЯ КАССЕТЫ  
С ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЯ

Ответственные за выпуск М.А.Хаммурадов, Л.М.Ракизвенко

Редактор, корректор Т.В.Ситянская

---

Подписано в печать 10.06.81. Т-09883. Формат 60x84/16.  
Бум. офсетн. № 1. Офсетн. печ. 1,0 усл.п.л. 0,6 уч.-изд.л.  
Тираж 220. Заказ 660. Цена 9 коп. Индекс 3624

---

Харьков-108, ротاپринт ХФТИ АН УССР.

9 коп.

Индекс 3624

Препринт ХФТИ 81-33, Харьков, 1981, 1-11.