

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра теплоэнергетики

Составитель О. А. Чергинец

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ

Методические указания к практическим занятиям Часть 2

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления подготовки
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2025

Рецензенты:

Темникова Е. Ю. – доцент кафедры теплоэнергетики

Богомолов А. Р. – председатель учебно-методической комиссии направления подготовки магистратуры 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Чергинец Ольга Александровна

Моделирование процессов горения : методические указания к практическим занятиям. Часть 2: для студентов направления подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль Промышленная теплоэнергетика / Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева ; кафедра теплоэнергетики ; составитель О. А. Чергинец. – Кемерово : КузГТУ, 2025. – 1 файл (857 КБ). – Текст : электронный.

Приведено содержание практических занятий, необходимое для успешного моделирования топочных процессов на примере котла ТП-87.

Методические указания к практическим занятиям составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Моделирование процессов горения» и предназначены для магистров направления подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль Промышленная теплоэнергетика, всех форм обучения.

© Кузбасский государственный
технический университет имени
Т. Ф. Горбачева, 2025

© Чергинец О. А., составление, 2025

1. Корректировка модели

Моделирование

Моделирование – это создание модели и работа с ней.

Модель – это приближенное отражение реальности.

Формы отображения моделей:

- материальные предметы (3D модель);
- сигнал на аналоговых устройствах (мнемосхемы, щит управления котлом, пульт на станции);
- символьная (знаковая) форма.

Модели можно разделить по иерархии:

- модель электростанции (мнемосхема);
- модель котла;
- модель топки;
- модель горения частицы.

Цель моделирования: предпроектный анализ (просчет различных вариантов, выбор оптимального); прогнозирование поведения модели с течением времени с целью управления поведением этой модели.

Важный критерий – адекватность модели (сопоставление с экспериментальными данными или расчетами)

В данной дисциплине мы будем изучать **математическое моделирование** – это численное моделирование методом конечных разностей.

Последовательность проведения моделирования:

1. Физическая постановка задачи (что моделировать, рисунки, схемы).
2. Математическая постановка задачи (дифференциальное уравнение (ДУ), описывающее исследуемый процесс, краевые условия и т.д.).
3. Построение сеточной области.
4. Преобразование ДУ и краевых условий к конечно-разностным выражениям.

5. Определение алгоритма решения, создание программы и ее отладка.
6. Проверка модели на адекватность.
7. Проведение исследований.
8. Анализ, выводы.

Основы метода конечных разностей

Суть метода конечных разностей

1. Область непрерывного изменения аргументов (x, y, z) заменяется дискретным количеством точек (узлов)
2. Функция непрерывных аргументов T, Q заменяется функциями дискретных аргументов
3. Производные, входящие в ДУ, и граничные условия заменяются более простыми разностными выражениями.

В результате замены задача в частных производных сводится к решению простых алгебраических уравнений.

Если при уменьшении сетки решение не изменяется, то задача решена верно.

Построение сетки

1. Горизонтальная ось – пространственная координата, r

$$R_1 \leq r \leq R_2$$

$R_1 = 0$ принимают

Пространственную ось разбивают на шаги:

$$h = \Delta r$$

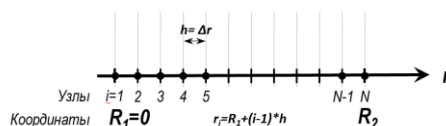
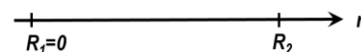
Нумерация узлов от $i = 1$ до N

Любая координата описывается уравнением:

$$r_i = R_1 + (i - 1) \cdot h, \text{ где } i = 1, 2, 3 \dots N$$

Шаг определяется:

$$h = \frac{R_2 - R_1}{N - 1}$$



В сложных системах процессы нестационарные, то есть изменяются с течением времени. Поэтому для определения процесса в любой момент времени вводится временная координата.

2. Вертикальная ось – временная координата, τ

$$0 \leq \tau \leq \tau_3$$

Временную ось разбивают на шаги $\Delta\tau$.

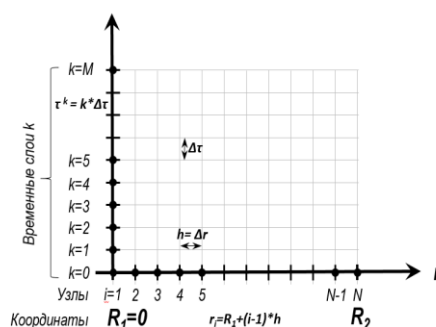
Шаг определяется как

$$\Delta\tau = \frac{\tau_3}{M}$$

Любая координата описывается уравнением:

$$\tau^k = k \cdot \Delta\tau, \text{ где } k = 0, 1, 2, 3 \dots M$$

k – временной слой.

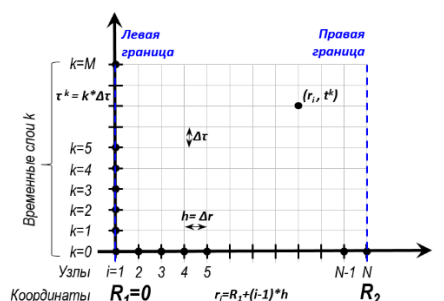


Итоговый вид сетки

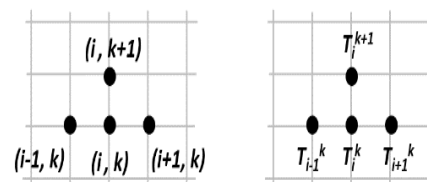
Крайние узлы по пространственной координате попадают на границу. Там будут граничные условия. Слева ($i = 1$) – левые граничные условия, справа ($i = N$) – правые.

Любая точка в любой момент времени будет характеризоваться пространственной и временной координатой (r_i, τ^k).

Функция (температуры) в этой точке будет отображаться как $T(r_i, \tau^k) = T_i^k$



Шаблон – это совокупность узлов определенной конфигурации (необходим для решения задачи по явной разностной схеме)



Аппроксимация дифференциальных операторов (при разложении в ряд Тейлора)

$$T_i^{k+1} = T(r_i, \tau^{k+1}) = T(r_i, \tau^k + \Delta\tau) = T_i^k + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right) \cdot \Delta\tau \quad (1.1)$$

$$T_{i+1}^k = T(r_{i+1}, \tau^k) = T(r_i + h, \tau^k) = T_i^k + h \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{h^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right) + \frac{h^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 T}{\partial r^3}\right) \quad (1.2)$$

$$T_{i-1}^k = T(r_{i-1}, \tau^k) = T(r_i - h, \tau^k) = T_i^k - h \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{h^2}{2!} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right) - \frac{h^3}{3!} \left(\frac{\partial^3 T}{\partial r^3}\right) \quad (1.3)$$

Из уравнений 1.1-1.3 выражаем дифференциальные операторы:

Из 1.1 выражаем:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta\tau} \quad (1.4)$$

Из 1.2 вычитаем 1.3:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{i+1}^k - T_{i-1}^k}{2 \cdot h} \quad (1.5)$$

Складываем 1.2. и 1.3:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{i+1}^k - 2 \cdot T_i^k + T_{i-1}^k}{h^2} \quad (1.6)$$

Получили разностные выражения, которые заменяют производные первого и второго порядка.

Когда выполняем расчеты (вручную или через ЭВМ) неизбежно возникают ошибки округления. При очень точных и больших вычислениях они могут стать очень значительными, и могут исказить смысл вычислений. Если это происходит, говорят, что численный метод (или алгоритм) *неустойчив*.

Устойчивый алгоритм – когда ошибки округления затухают или не возрастают.

Критерий устойчивости:

$$p = \frac{a \cdot \Delta\tau}{h^2} \leq \frac{1}{2} \quad (1.7)$$

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q_v}{c_p \cdot \rho} \quad (1.8)$$

где ν – фактор формы, принимающий значение 0 – для пластины, 1 – для цилиндра, 2 – для шара.

Заменяем производные 1-го и 2-го порядка на линейные функции (см. формулы 1.4-1.6):

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta\tau} = a \cdot \left(\frac{T_{i+1}^k - 2 \cdot T_i^k + T_{i-1}^k}{h^2} + \frac{\nu}{r} \cdot \frac{T_{i+1}^k - T_{i-1}^k}{2 \cdot h} \right) + \frac{q_v}{c_p \cdot \rho}$$

С целью упрощения выражения введем переменные

$$p = \frac{a \cdot \Delta\tau}{h^2} \text{ и } W = \frac{q_v \cdot \Delta\tau}{c_p \cdot \rho}$$

$$T_i^{k+1} - T_i^k = p \cdot \left(T_{i+1}^k - 2 \cdot T_i^k + T_{i-1}^k + \frac{\nu \cdot h}{2 \cdot r} \cdot (T_{i+1}^k - T_{i-1}^k) \right) + W$$

Выражаем температуру T_i^{k+1} на последующем временном слое (если известны температуры T_i^k на текущем временном слое):

$$\boxed{T_i^{k+1} = T_i^k + p \cdot \left(T_{i+1}^k - 2 \cdot T_i^k + T_{i-1}^k + \frac{\nu \cdot h}{2 \cdot r} \cdot (T_{i+1}^k - T_{i-1}^k) \right) + W} \quad (1.9)$$

Таким образом, для определения температуры в каком-нибудь одном узле сетки на временном слое $(k + 1)$ требуется три температуры на предыдущем временном слое k (см. шаблон).

Аппроксимация начальных и граничных условий

Начальные условия (НУ) задают значение функций в начальный (или заданный) момент времени.

$$\text{НУ: } T(r_i, \tau^{k=0}) = T(r, \tau = 0) = T_i^0 = T_n \\ \text{при } k = 0 \text{ для } i = 1 \text{ до } N$$

Граничные условия (ГУ)

ГУ I рода: задана функция (температура) на поверхности тела или на границе рассматриваемой области. Узлы сетки с наименьшим ($i = 1$) и наибольшим ($i = N$) номерами располагаются на поверхности тела.

$$\text{ГУ левые: } T(r_{i=1}, \tau^k) = T(R_1, \tau) = T_1^k = T_{\text{лев}}$$

$$\text{ГУ правые: } T(r_{i=N}, \tau^k) = T(R_2, \tau) = T_N^k = T_{\text{пр}}$$

где $T_{\text{лев}}$ и $T_{\text{пр}}$ заданные температуры на левой и правой поверхности тела.

ГУ II рода: задан тепловой поток q на границе тела.

ГУ III рода: задан закон теплообмена поверхности тела со средой (в соответствии с законами Ньютона–Рихмана, Стефана–Больцмана).

ГУ IV рода: задаются в месте контакта тел (сред), в которых определяются поля температур.

Особенности работы при заданных ГУ II-IV рода можете изучить самостоятельно.

Задача:

Определить температурное поле T в бесконечной пластине толщиной R по явной разностной схеме при граничных условиях первого рода для времени $\tau \leq \tau_3$.

Вывод значений $T(r, \tau)$ провести на первых пяти временных слоях и затем на каждом десятом временном слое. В расчетах принять следующие данные:

Дано:

$$a = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$R = 0,04 \text{ м}$$

$$\tau_3 = 900 \text{ с}$$

$$T_n = 300,0^\circ\text{C}$$

$$A = 300,0^\circ\text{C}$$

$$B = 0,1^\circ\text{C}/\text{с}$$

$$C = 550,0^\circ\text{C}$$

$$D = 0,01^\circ\text{C}/\text{с}$$

$$F = 10^{-5}^\circ\text{C}/\text{с}^2$$

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$$

$$0 \leq \tau \leq \tau_3$$

$$0 < r < R$$

Начальные условия:

$$T(r, 0) = T_n$$

Граничные условия:

$$T(0, \tau) = A + B \cdot \tau$$

$$T(R, \tau) = C + D \cdot \tau + F \cdot \tau^2$$

Найти:

$$T(r_i, \tau^k)$$

при $k = 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30 \dots 900$

Решение:

Для построения сеточной области:

1. Принимаем количество узлов по пространственной координате: $N = 11$

2. Определяем пространственный шаг:

$$h = \frac{R}{N - 1} = \frac{0,04}{11 - 1} = 0,004 \text{ м}$$

3. Определяем временной шаг (выражаем из критерия устойчивости):

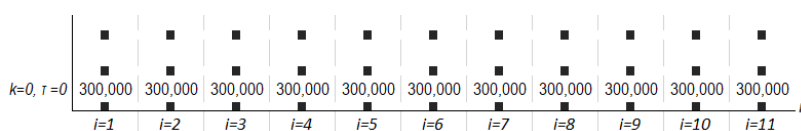
$$\Delta \tau \leq \frac{h^2}{2 \cdot a} = \frac{0,004^2}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-6}} = 5,33 \text{ с}$$

Для простоты расчетов округляем до $\Delta \tau = 5 \text{ с}$

4. Заполнение температурного поля в сеточной области в начальный момент времени:

$$k = 0, \tau^k = k \cdot \Delta \tau = 0 \cdot 5 = 0 \text{ с}$$

$$T(r, 0) = T_n = 300,0^\circ\text{C}$$



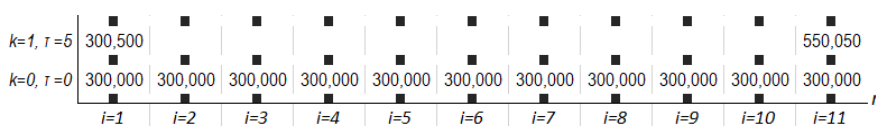
5. Переходим на следующий временной слой:

$$\tau^k = k \cdot \Delta \tau = 1 \cdot 5 = 5 \text{ с}$$

6. Заполняем граничные условия

$$T(0, \tau) = A + B \cdot \tau = 300,0 + 0,1 \cdot 5 = 300,05^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} T(R, \tau) &= C + D \cdot \tau + F \cdot \tau^2 \\ &= 550,0 + 0,01 \cdot 5 + 10^{-5} \cdot 5^2 = \\ &= 550,05^\circ\text{C} \end{aligned}$$



7. Переходим к заполнению промежуточных значений:

Аппроксимируем уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$$

$$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\Delta \tau} = a \cdot \left(\frac{T_{i+1}^k - 2 \cdot T_i^k + T_{i-1}^k}{h^2} \right)$$

Выражаем T_i^{k+1} :

$$T_i^{k+1} = T_i^k + \frac{a \cdot \Delta \tau}{h^2} \cdot (T_{i+1}^k - 2 \cdot T_i^k + T_{i-1}^k) =$$

$$= (1 - 2 \cdot p) \cdot T_i^k + p \cdot (T_{i+1}^k + T_{i-1}^k)$$

где $p = \frac{a \cdot \Delta \tau}{h^2}$.

Таким образом, чтобы определить температуру на $(k + 1)$ временном слое необходимо знать температуры на слое k (см. шаблон).

8. Вычисляем коэффициент p и определяем промежуточные значения:

$$p = \frac{a \cdot \Delta \tau}{h^2} = \frac{1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 5}{0,004^2} = 0,47$$

при $k = 0, i = 2$:

$$T_i^{k+1} = T_2^1 = (1 - 2 \cdot p) \cdot T_i^k + p \cdot (T_{i+1}^k + T_{i-1}^k)$$

$$= (1 - 2 \cdot 0,47) \cdot T_i^k + 0,47 \cdot (T_{i+1}^k + T_{i-1}^k)$$

$$= 0,063 \cdot T_2^0 + 0,47 \cdot (T_3^0 + T_1^0)$$

$$= 0,063 \cdot 300 + 0,47 \cdot (300 + 300) = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

при $k = 0, i = 3$:

$$T_i^{k+1} T_3^1 = 0,063 \cdot T_3^0 + 0,47 \cdot (T_4^0 + T_2^0)$$

$$= 0,063 \cdot 300 + 0,47 \cdot (300 + 300) = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

при $k = 0$ и $i = 4$ до 10 считаем аналогичным образом.

После окончания расчетов сеточная область будет выглядеть следующим образом.

$k=1, \tau=5$	<div>■ 300,500</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 550,050</div>
$k=0, \tau=0$	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>	<div>■ 300,000</div>
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$

9. Переходим на следующий временной слой:

$$\tau^k = k \cdot \Delta\tau = 2 \cdot 5 = 10 \text{ с}$$

10. Заполняем граничные условия

$$T(0, \tau) = A + B \cdot \tau = 300,0 + 0,1 \cdot 10 = 301,000^\circ\text{C}$$

$$T(R, \tau) = C + D \cdot \tau + F \cdot \tau^2 = 550,0 + 0,01 \cdot 10 + 10^{-5} \cdot 10 = 550,101^\circ\text{C}$$

11. Переходим к заполнению промежуточных значений:

при $k=1, i=2$:

$$T_i^{k+1} = T_2^2 = 0,063 \cdot T_2^1 + 0,47 \cdot (T_3^1 + T_1^1) = 0,063 \cdot 300,500 + 0,47 \cdot (300,000 + 300,000) = 300,234^\circ\text{C}$$

Остальные промежуточные значения для $i = 2$ до 10 заполняются аналогично.

Заполненный временный слой сеточной области будет выглядеть следующим образом.

$k=2, \tau=10$	301,000	300,234	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	417,211	550,101
$k=1, \tau=5$	300,500	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	550,050
$k=0, \tau=0$	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$

12. Далее переходим на следующий временной слой и повторяем расчеты аналогичным образом.

Пример заполненных 10-ти временных слоев сеточной области будет выглядеть следующим образом:

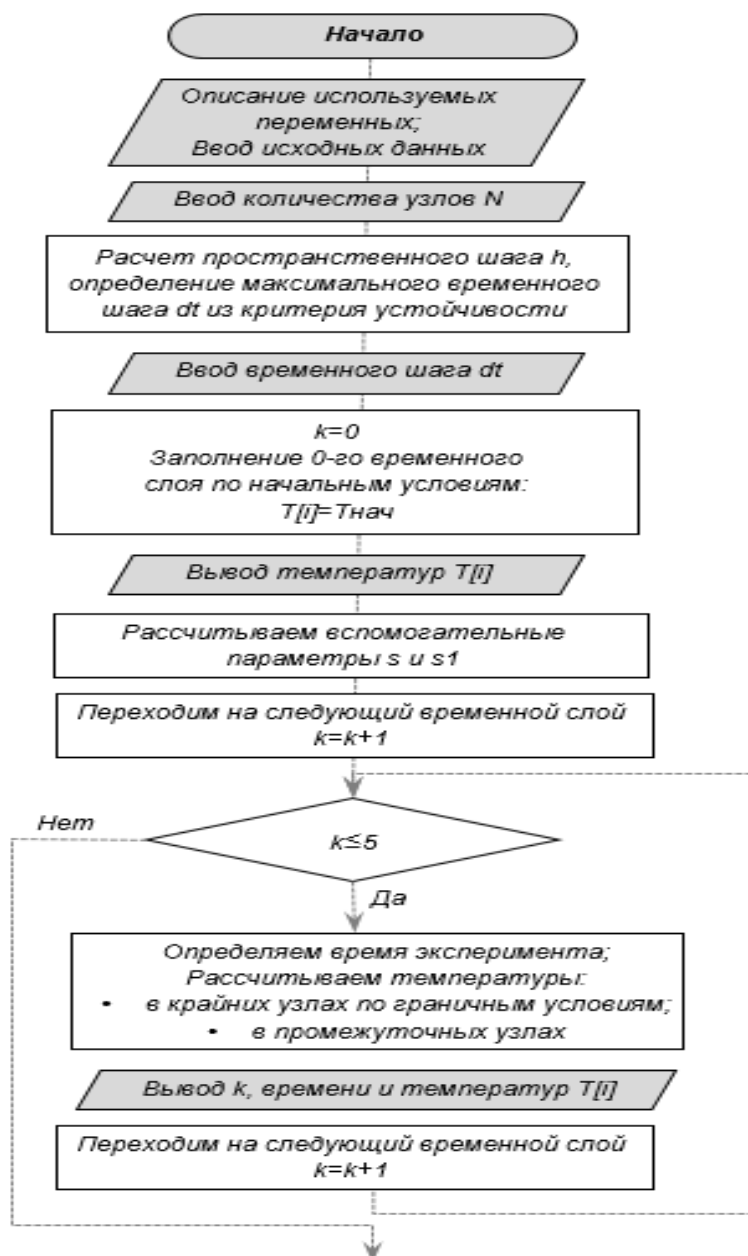
$k=10, \tau=50 \text{ сек}$	305,000	303,135	302,397	304,585	309,482	323,037	343,544	379,731	425,650	485,611	550,525
$k=9, \tau=45 \text{ сек}$	304,500	302,491	301,855	302,377	307,609	316,837	339,292	370,817	421,360	481,055	550,470
$k=8, \tau=40 \text{ сек}$	304,000	302,129	301,030	301,691	303,815	314,033	330,234	365,758	412,074	478,200	550,416
$k=7, \tau=35 \text{ сек}$	303,500	301,773	300,806	300,316	302,759	307,455	326,183	353,553	406,960	471,277	550,362
$k=6, \tau=30 \text{ сек}$	303,000	301,431	300,592	300,209	300,054	305,670	315,093	348,175	392,731	467,643	550,309
$k=5, \tau=25 \text{ сек}$	302,500	301,096	300,407	300,113	300,024	300,000	312,072	330,589	386,623	455,687	550,256
$k=4, \tau=20 \text{ сек}$	302,000	300,785	300,233	300,051	300,000	300,000	300,000	325,754	361,822	450,798	550,204
$k=3, \tau=15 \text{ сек}$	301,500	300,483	300,110	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	354,943	424,561	550,152
$k=2, \tau=10 \text{ сек}$	301,000	300,234	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	417,211	550,101
$k=1, \tau=5 \text{ сек}$	300,500	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	550,050
$k=0, \tau=0 \text{ сек}$	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000	300,000
	$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$	$i=5$	$i=6$	$i=7$	$i=8$	$i=9$	$i=10$	$i=11$

На следующем занятии рассмотрим решение данной задачи на ПК в Pascal ABC.

Решение задачи на ПК в Pascal ABC

Блок-схема

Составим блок-схему вычислительного процесса



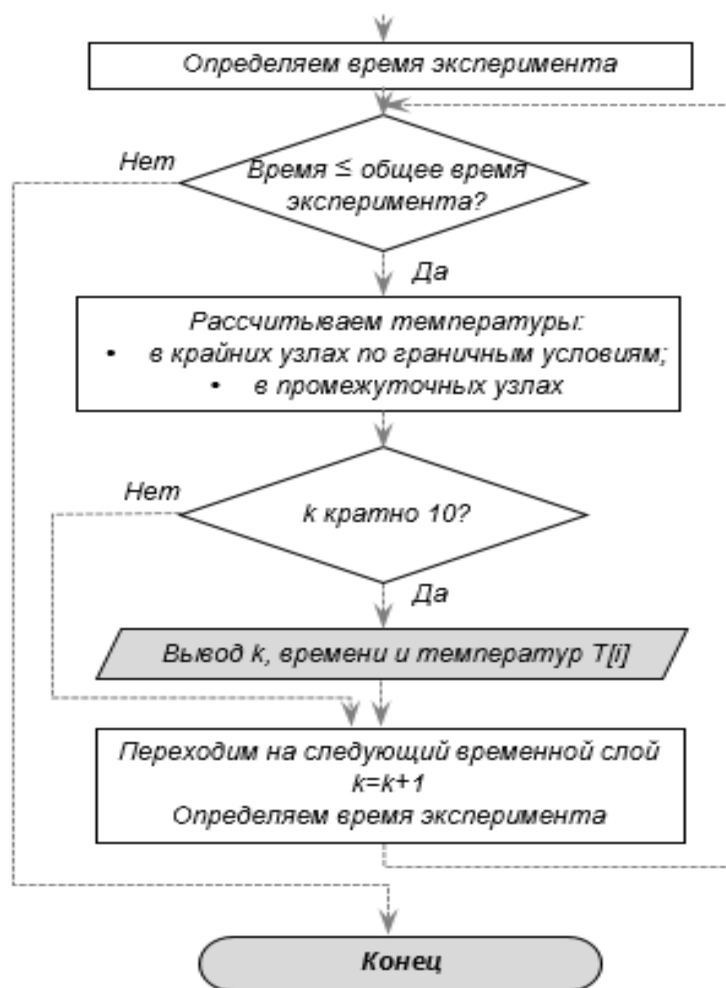


Рис 1. Блок-схема алгоритма определения температурного поля в пластине по явной разностной схеме при граничных условиях первого рода

Программный код

Программный код	Описание
program z1;	Данной строкой указывается наименование вашей программы. В данном случае наименование принято «z1».
var T, T1: array [1..1000] of real; a, R, Tn, A1, B1, C1, D1, F1, h, dt, time, s, s1: real; tz, N, i, k: integer;	При помощи оператора var прописываются все переменные, которые будут встречаться в программе. В программе будут использоваться два массива данных: массив T и вспомогательный массив T1, значения которых являются дробными

Программный код	Описание
	<p>числами (real) в диапазоне от 1 до 1000.</p> <p>Далее указываются иные параметры, используемые в задаче, являющиеся дробными (real) и целыми (integer) числами.</p> <p><i>Примечание:</i> поскольку коэффициент температуропроводности обозначен литерой «а», то чтобы исключить повторение коэффициенты уравнений, используемых для описания процессов в граничных условиях, приняты с цифрой 1 (например, A1, B1 и т.д.)</p>
begin	Начало расчетов
a:=0.0000015; R:=0.04; Tn:=300; A1:=300; B1:=0.1; C1:=550; D1:=0.01; F1:=0.00001; tz:=900;	<p>Вводятся все данные, указанные в условии задачи.</p> <p>Обратите внимание, вместо «:=» используется знак присвоить значение «:=», в дробных числах вместо запятой дробная часть отделяется точкой «.», а в конце каждой строки прописывается «;».</p>
writeln('Введите количество узлов в сетке, N');	<p>Оператор write(..) или writeln(..) отвечает за вывод данных на вашем экране, в скобках в апострофах «'...'» прописывается та информация, которая должна отображаться на экране (для вашего понимания, какой параметр будете вводить с клавиатуры).</p> <p>В данном примере с клавиатуры будет введен параметр N отвечающий за количество узлов в сетке. Данный параметр может выбираться вами любым, но чем он больше, тем более точно решена задача</p>
readln(N);	Оператор readln() «дает пояснение» программе, какой параметр вы ввели с клавиатуры.

Программный код	Описание
$h:=R/(N-1);$	Введенных данных достаточно, чтобы определить пространственный шаг при помощи данной формулы
<code>writeln('Пространственный шаг равен ',h:0:3, ' м');</code>	Далее выводим значение рассчитанного пространственного шага, где цифры после h «:0:3» отвечают за округление рассчитанного числа (в данном случае до 3-х знаков после запятой)
$dt:=h*h/(2*a);$	Далее, зная пространственный шаг h и используя условие устойчивости, можем определить каким максимально возможным может быть временной шаг (шаг по временной координате) по данной формуле;
<code>writeln('Из условия устойчивости явной схемы временной шаг должен быть менее ', dt:0:2, ' с');</code>	Отображение результата расчета с округлением его до 2-х знаков после запятой
<code>writeln('Введите временной шаг, с');</code> <code>readln(dt);</code>	Поскольку с дробными числами работать крайне неудобно, зададим временной шаг целым числом, но обязательно меньше рассчитанного значения
$k:=0;$ $time:=k*dt;$ <code>writeln('k=', k, ' ', 'Time=', time, ' с');</code>	Далее приступаем к расчету 0-го временного слоя при $k = 0$. Определяем время (time) эксперимента. Выводим значение k и значение времени
<code>for i:=1 to N do</code> <code>begin</code> $T[i]:=T_n;$ $T1[i]:=T[i];$ <code>write(T[i]:0:3, ' ');</code> <code>end;</code>	Для узлов i от 1 до N Присваиваем температуре в узлах значение температуры в начальный момент времени (T_n , по условию задачи). Значения массива $T[i]$ записываем в вспомогательный массив $T1[i]$. Выводим значение массива $T[i]$, а именно температуры во всех узлах, округляя до 3-х знаков после запятой, и разделяя значения пробелами ' '
<code>writeln();</code>	Оператор <code>writeln()</code> позволяет перейти

Программный код	Описание
	ти на новую строку и выводить все последующие значения с новой строки. Для сравнения оператор write() выводит данные на той же строке (без перехода на новую).
s:=a*dt/(h*h); s1:=1-2*s;	Рассчитываем вспомогательные коэффициенты, которые в дальнейшем будут использованы для основного уравнения.
k:=k+1;	Переходим на следующий временной слой
while k<=5 do	Пока временной слой будет меньше либо равен 5 будем выполнять следующие расчеты. Данное условие необходимо, так как согласно условию задачи требуется вывести данные температуры на первых пяти временных слоях.
begin time:=k*dt; writeln('k=', k, ' ', 'Time=', time, 'c');	Определяем время от начала эксперимента, выводим значения временного слоя и времени.
T[1]:=A1+B1*time; T[N]:=C1+D1*time+F1*time*time;	Определяем значение температур на границах пластины в узлах $i = 1$ и $i = N$ согласно граничным условиям, указанным в задаче.
for i:= 2 to N-1 do begin T[i]:=s*(T1[i-1]+T1[i+1])+s1*T1[i]; end;	Определяем значение температур в промежуточных узлах сетки.
for i:=1 to N do begin T1[i]:=T[i]; write(T[i]:0:3, ' '); end;	Для всех узлов временного слоя переписываем данные на вспомогательный массив и выводим данные массива (температуры во всех узлах).
writeln(); k:=k+1; end;	Переходим на новую строку. Переходим на следующий временной слой.
time:=k*dt;	Определяем время эксперимента для k-го слоя.
while time<=tz do	Пока время меньше или равно общему времени эксперимента по

Программный код	Описание
	условию задачи
begin $T[1] := A1 + B1 * \text{time};$ $T[N] := C1 + D1 * \text{time} + F1 * \text{time} * \text{time};$ for i:= 2 to N-1 do begin $T[i] := s * (T1[i-1] + T1[i+1]) + s1 * T1[i];$ end;	Рассчитываем температуры во всех узлах временного слоя
If k mod 10 = 0 then	Если временной слой кратный 10 (по условию задачи), а именно если остаток от деления k на 10 равен 0, то
begin writeln('k=', k, ' ', 'Time=', time, 'c'); for i:=1 to N do begin $T1[i] := T[i];$ write(T[i]:0:3, ' '); end;	То выводим значения температур во всех узлах,
writeln(); $k := k + 1;$ $\text{time} := k * dt;$ end	Переходим на следующий временной слой, рассчитываем время и т.д.
else begin for i:=1 to N do $T1[i] := T[i];$ $k := k + 1;$ $\text{time} := k * dt;$ end; end; end.	Иначе (если k не кратно 10) Значение температур не выводим, Переходим на следующий временной слой и повторяем цикл.

Пример, возможных ошибок

Ошибка	Пояснение
Встречено 'B1', а ожидалось ';' <i>(Вместо B1 может быть указан любой параметр)</i>	Данная ошибка говорит о том, что в предыдущей строке (над выделенной) в конце пропущен знак «;»
Встречено '=', а ожидалось ':' или Встречено '=', а ожидалось ';'	Указан знак «=», вместо знака присвоить значение «:=»
Неизвестное имя 'R' <i>(Вместо R может быть указан любой параметр)</i>	Значит данная переменная не прописана в операторе Var
Встречено ',', а ожидалось ';'	Аналогичная ошибка может возникнуть, если в дробном числе в качестве разделителя дробной части указать запятую «,», а не точку «.»

2. Анализ результатов

В случае если все введено верно, отладка программы произошла успешно, вы получите следующий результат:

Окно вывода										
Введите количество узлов в сетке, N										
11										
Пространственный шаг равен 0.004 м										
Из условия устойчивости явной схемы временной шаг должен быть менее 5.33 с										
Введите временной шаг, с										
5										
K=0	Time=0с									
300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000
K=1	Time=5с									
300.500	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	550.050
K=2	Time=10с									
301.000	300.234	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	417.211	550.101
K=3	Time=15с									
301.500	300.483	300.110	300.000	300.000	300.000	300.000	300.000	354.943	424.561	550.152
K=4	Time=20с									
302.000	300.785	300.233	300.051	300.000	300.000	300.000	325.754	361.822	450.798	550.204
K=5	Time=25с									
302.500	301.096	300.407	300.113	300.024	300.000	312.072	330.589	386.623	455.687	550.256
k=10	Time=50с									
305.000	303.135	302.397	304.585	309.482	323.037	343.544	379.731	425.650	485.611	550.525
k=20	Time=100с									
310.000	312.917	318.146	327.370	341.270	361.586	388.088	421.672	460.825	504.790	551.100
k=30	Time=150с									
315.000	323.670	334.400	348.172	365.634	387.381	413.428	443.687	477.444	513.870	551.725
k=40	Time=200с									
320.000	332.559	346.808	363.315	382.494	404.609	429.671	457.500	487.657	519.543	552.400
k=50	Time=250с									
325.000	339.891	356.209	374.273	394.313	416.450	440.663	466.791	494.534	523.479	553.125
k=60	Time=300с									
330.000	346.196	363.651	382.529	402.941	424.928	448.442	473.350	499.432	526.396	553.900
k=70	Time=350с									
335.000	351.854	369.860	389.088	409.574	431.310	454.233	478.226	503.120	528.701	554.725
k=80	Time=400с									
340.000	357.107	375.300	394.591	414.967	436.392	458.792	482.063	506.068	530.642	555.600
k=90	Time=450с									
345.000	362.109	380.264	399.438	419.592	440.670	462.593	485.266	508.570	532.371	556.525
k=100	Time=500с									
350.000	366.956	384.932	403.881	423.744	444.455	465.932	488.084	510.806	533.985	557.500
k=110	Time=550с									
355.000	371.707	389.421	408.077	427.608	447.941	468.993	490.675	512.893	535.544	558.525
k=120	Time=600с									
360.000	376.402	393.800	412.124	431.300	451.249	471.890	493.137	514.900	537.086	559.600
k=130	Time=650с									
365.000	381.062	398.115	416.084	434.891	454.456	474.698	495.532	516.873	538.633	560.725
k=140	Time=700с									
370.000	385.703	402.394	419.995	438.427	457.609	477.460	497.898	518.839	540.201	561.900
k=150	Time=750с									
375.000	390.333	406.653	423.881	441.936	460.737	480.206	500.259	520.817	541.798	563.125
k=160	Time=800с									
380.000	394.959	410.904	427.756	445.435	463.860	482.951	502.630	522.816	543.431	564.400
k=170	Time=850с									
385.000	399.584	415.154	431.631	448.936	466.988	485.709	505.020	524.843	545.103	565.725
k=180	Time=900с									
390.000	404.210	419.407	435.512	452.445	470.129	488.485	507.435	526.904	546.817	567.100

Варианты заданий для выполнения практической работы №1:

Задача. Определить температурное поле T в бесконечной пластине по явной разностной схеме при $\tau \leq \tau_3$. Вывести значения температур $T(r, \tau)$ на первых пяти временных слоях и далее на каждом пятом временном слое. Построить график распределения температур по 25 с, 200 с, 400 с, 600 с, 800 с от начала эксперимента.

Уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2}$$

$$0 < \tau \leq \tau_3$$

$$0 < r \leq R$$

Начальное условие:

$$T(r, 0) = T_H$$

Граничные условия:

$$T(0, \tau) = A + B \cdot \tau$$

$$T(R, \tau) = C + D \cdot \tau + F \cdot \tau^2$$

Исходные данные для расчёта по вариантам:

№ варианта	$a, \frac{m^2}{c}$	R, m	τ_3, c	$T_H, ^\circ C$	$A, ^\circ C$	$B, ^\circ C/c$	$C, ^\circ C$	$D, ^\circ C/c$	$F, ^\circ C/c^2$
1	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,04	900	210	210	0,1	500	0,03	$1 \cdot 10^{-5}$
2	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,05	900	220	220	0,2	510	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$
3	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,06	900	230	230	0,3	520	0,02	$1 \cdot 10^{-5}$
4	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,07	900	240	240	0,2	530	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$
5	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,08	900	250	250	0,1	540	0,03	$1 \cdot 10^{-5}$
6	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,09	900	260	260	0,2	525	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$
7	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,10	900	270	270	0,3	535	0,02	$1 \cdot 10^{-5}$
8	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,07	900	280	280	0,2	515	0,03	$1 \cdot 10^{-5}$
9	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,06	900	290	290	0,3	520	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$
10	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,07	900	300	300	0,2	530	0,02	$1 \cdot 10^{-5}$
11	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,08	900	240	240	0,1	500	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$
12	$1,5 \cdot 10^{-6}$	0,05	900	230	230	0,2	480	0,02	$1 \cdot 10^{-5}$