

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский химико-технологический университет имени Д.И.
Менделеева»

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №1

Вариант 22

Выполнил студент группы КС-36: Золотухин А.А.

Ссылка на репозиторий: [https://github.com/
CorgiPuppy/
num-methods-eq-math-phys-chem-labs](https://github.com/CorgiPuppy/num-methods-eq-math-phys-chem-labs)

Принял: Лебедев Данила Александрович

Дата сдачи: 02.04.2025

Москва
2025

Оглавление

Описание задачи	1
Выполнение задачи	2
Задание 1	2
Задание 2	2
Задание 3	3
Задание 4	4
Задание 5	4
Задание 8	5
Задание 8	6

Описание задачи

Вариант	Уравнение	Интервалы переменных	Начальные и граничные условия
22	$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$	$x \in [0, 1]$ $t \in [0, 1]$	$u(t = 0, x) = e^x$ $u(t, x = 0) = e^t$ $u(t, x = 1) = e^{t+1}$

Для заданного уравнения:

1. записать явную разностную схему;
2. определить порядок аппроксимации разностной схемы;
3. получить условие устойчивости разностной схемы на шаг (с помощью метода гармоник);
4. вывести рекуррентное соотношение;
5. составить алгоритм (блок-схему) расчёта;
6. построить программу на любом удобном языке программирования;
7. провести численный расчёт с использованием различных значений $\Delta t(0.1, 0.01, 0.001)$, $h = 0.1$;
8. составить отчёт о проделанной работе.

Выполнение задачи

Задание 1

Записать явную разностную схему:

$$\frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\Delta t} = \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{h^2}. \quad (1)$$

В записанной разностной схеме (1) аппроксимация второй производной функции $u(t, x)$ по координате рассматривается на n -м шаге по времени, т.е. относительно точки t^n , для которой рассматривается аппроксимация всего уравнения. Такая разностная схема называется **явной**.

Задание 2

Определить порядок аппроксимации разностной схемы (1):

Для этого запишу разложение значений u_j^{n+1} , u_{j+1}^n , u_{j-1}^n в ряд Тейлора относительно точки (t^n, x_j) на разностной сетке:

$$u_j^{n+1} = u_j^n + \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_j^n \Delta t + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_j^n (\Delta t)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} \Big|_j^n (\Delta t)^3 + \dots, \quad (2)$$

$$u_{j+1}^n = u_j^n + \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_j^n h + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_j^n h^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \Big|_j^n h^3 + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \Big|_j^n h^4 + \dots, \quad (3)$$

$$u_{j-1}^n = u_j^n - \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_j^n h + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_j^n h^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} \Big|_j^n h^3 + \frac{1}{4!} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \Big|_j^n h^4 - \dots \quad (4)$$

Подставляя зависимости (2)-(4) в разностную схему (1), получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_j^n + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_j^n \Delta t + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} \Big|_j^n (\Delta t)^2 &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_j^n + \frac{1}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} \Big|_j^n h^2. \\ \Rightarrow \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_j^n + O(\Delta t) &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \Big|_j^n + O(h^2). \end{aligned}$$

Таким образом, явная разностная схема (1) аппроксимирует исходное дифференциальное уравнение с первым порядком по времени и со вторым порядком по координате, что записывается в следующем виде:

$$O(\Delta t) + O(h^2) \text{ или } O(\Delta t, h^2).$$

Задание 3

Получить условие устойчивости разностной схемы на шаг (с помощью метода гармоник):

Представляю решение разностной схемы в виде гармоник:

$$u_j^n = \lambda^n e^{i\alpha j}. \quad (5)$$

Подставляя (5) в разностную схему (1), получаю:

$$\frac{\lambda^{n+1} e^{i\alpha j} - \lambda^n e^{i\alpha j}}{\Delta t} = \frac{\lambda^n e^{i\alpha(j+1)} - 2\lambda^n e^{i\alpha j} + \lambda^n e^{i\alpha(j-1)}}{h^2}.$$

Упрощаю полученное выражение, деля левую и правую его части на $\lambda^n e^{i\alpha j}$:

$$\frac{\lambda - 1}{\Delta t} = \frac{e^{i\alpha} - 2 + e^{-i\alpha}}{h^2}.$$

Преобразую комплексные числа из экспоненциальной формы в тригонометрическую:

$$e^{\pm i\alpha} = \cos \alpha \pm i \sin \alpha \Rightarrow \frac{\lambda - 1}{\Delta t} = \frac{2 \cos \alpha - 2}{h^2}.$$

Используя тригонометрические тождества

$$\cos \alpha = \cos^2 \frac{\alpha}{2} - \sin^2 \frac{\alpha}{2} = 1 - 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2},$$

получаю формулу, из которой затем выражаю λ :

$$\frac{\lambda - 1}{\Delta t} = \frac{-4 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}{h^2} \Rightarrow \lambda = 1 - \frac{4\Delta t}{h^2} \sin^2 \frac{\alpha}{2}.$$

С учётом необходимого условия устойчивости разностных схем $|\lambda| \leq 1$ имею:

$$-1 \leq 1 - \frac{4\Delta t}{h^2} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \leq 1.$$

В полученном двойном неравенстве правое условие выполняется автоматически. Поэтому рассмотрю более подробно левое условие:

$$1 - \frac{4\Delta t}{h^2} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \geq -1 \Rightarrow \frac{\Delta t}{h^2} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \leq \frac{1}{2}.$$

Задавая для $\sin^2 \frac{\alpha}{2}$ максимально возможное значение, равное 1, перехожу к более строгому условию, справедливому для любого α :

$$\frac{\Delta t}{h^2} \sin^2 \frac{\alpha}{2} \leq \frac{1}{2} \Rightarrow \frac{\Delta t}{h^2} \leq \frac{1}{2}. \quad (6)$$

Выражение (6) является условием устойчивости явной разностной схемы, аппроксимирующей одномерное дифференциальное уравнение параболического типа. Такие

разностные схемы, устойчивость которых зависит от какого-либо условия, ограничивающего выбор интервала деления на разностной сетке, называют **условно устойчивыми**.

При $h = 10^{-1}$:

$$\Delta t \leq \frac{(10^{-1})^2}{2} \Rightarrow \Delta t \leq 5 \cdot 10^{-3}.$$

Задание 4

Вывести рекуррентное соотношение:

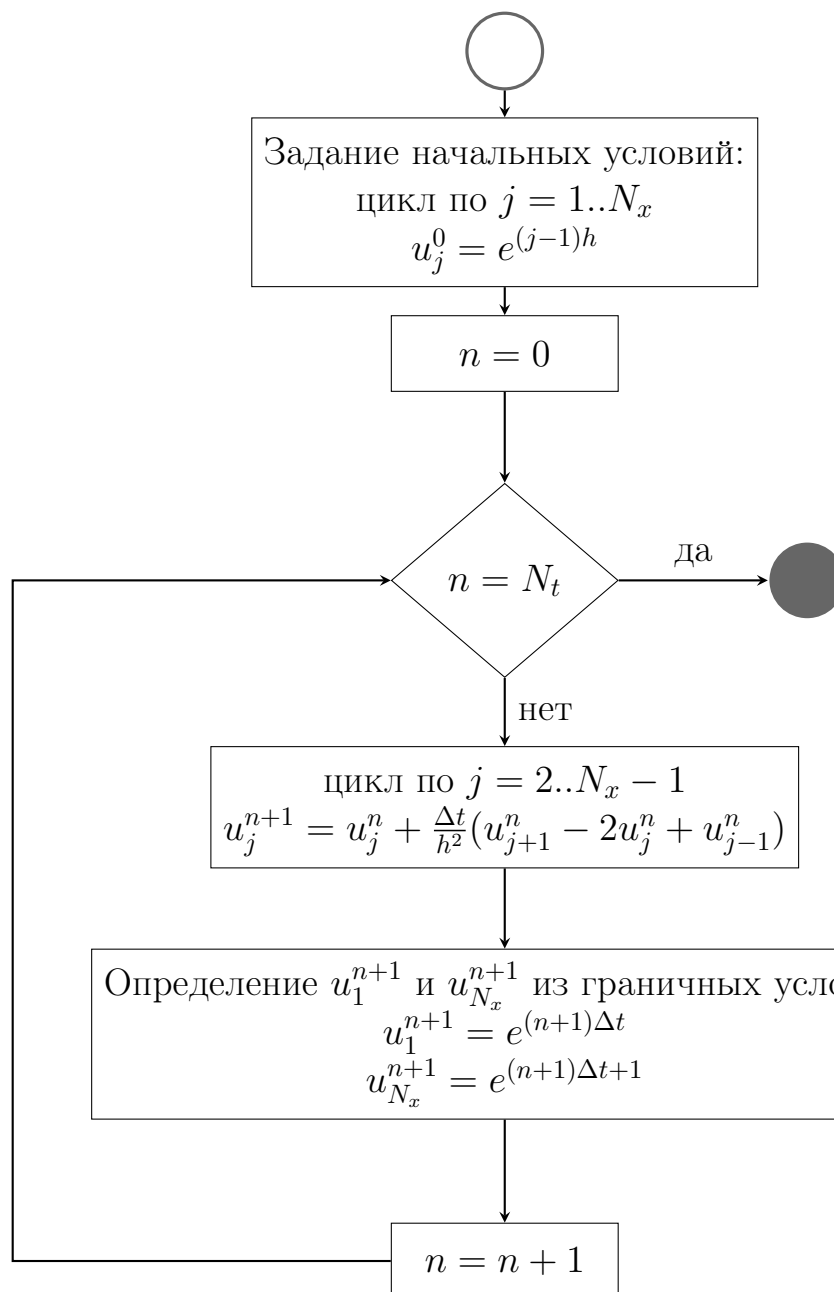
Выражаю из разностной схемы (1) величину u_j^{n+1} :

$$u_j^{n+1} = u_j^n + \frac{\Delta t}{h^2}(u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n). \quad (7)$$

Соотношение типа (7), позволяющее рассчитывать значения искомой функции в узлах разностной сетки через известные значения в других узлах разностной сетки, называют **рекуррентным соотношением**.

Задание 5

Составить алгоритм (блок-схему) расчёта:



Задание 8

Построить программу на любом удобном языке программирования:

```

1 #include <iostream>
2 #include <cmath>
3 #include <fstream>
4
5 #include "../include/Constants.h"
6
7 int main() {
8     int N_x = 1 + (Constants::x_end - Constants::x_start) / Constants::h;
9     int N_t[Constants::amount_of_delta_t] = {0};
10    for (int i = 0; i < Constants::amount_of_delta_t; i++)
11        N_t[i] = 1 + (Constants::t_end - Constants::t_start) / Constants::delta_t[i];
12
13    double u[N_t[0]][N_x] = {0.0};
  
```

```

14 for (int j = 0; j <= N_x - 1; j++) {
15     u[0][j] = std::exp(j * Constants::h);
16 }
17
18 int n = 0;
19
20 while (!(n == (N_t[0] - 1))) {
21     for (int j = 1; j <= N_x - 2; j++)
22         u[n + 1][j] = u[n][j] + (Constants::delta_t[2]) / (std::pow(Constants::h, 2)) *
23         (u[n][j + 1] - 2 * u[n][j] + u[n][j - 1]);
24
25     u[n + 1][0] = std::exp((n + 1) * Constants::delta_t[2]);
26     u[n + 1][N_x - 1] = std::exp((n + 1) * Constants::delta_t[2] + 1);
27
28     n++;
29 }
30
31 std::ofstream file (Constants::path);
32 for (int n = 0; n <= N_t[0] - 1; n++) {
33     double t = n * Constants::delta_t[2];
34     for (int j = 0; j <= N_x - 1; j++) {
35         double x = j * Constants::h;
36         file << t << " " << x << " " << u[n][j] << "\n";
37     }
38     file << "\n";
39 }
40 file.close();
41 return 0;
42 }

```

Задание 8

Составить отчёт о проделанной работе. График функции $u(t, x)$

График зависимости $u(t, x)$

