

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 |

## Описание задачи

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

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  $\lambda$ :

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

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  $\alpha$ :

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

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:

