

**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 №2**

## **Вариант 22**

**Выполнил студент группы КС-36: Золотухин Андрей Александрович**

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: 02.04.25

**Москва**

**2025**

## Оглавление

Описание задачи .....	3
Выполнение задачи .....	4
Задание 1 .....	4
Задание 2 .....	4
Задание 3 .....	4
Задание 4 .....	5
Задание 5 .....	5
Задание 6 .....	6
Задание 7 .....	6
Задание 8 .....	6

## Описание задачи

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

Для заданного уравнения:

1. записать неявную разностную схему;
2. определить порядок аппроксимации разностной схемы;
3. доказать абсолютную устойчивость разностной схемы (с помощью метода гармоник);
4. привести схему к виду, удобному для использования метода прогонки;
5. проверить сходимость прогонки;
6. найти  $\alpha_1, \beta_1, u_N^{n+1}$
7. записать рекуррентное прогоночное соотношение;
8. составить алгоритм (блок-схему) расчёта;
9. построить программу на любом удобном языке программирования;
10. провести численный расчёт с использованием различных значений  $\Delta t(0.1, 0.01, 0.001), h = 0.1$
11. составить отчёт о проделанной работе;
12. сравнить результаты расчётов заданий №1 и №2 друг с другом, а также с истинными значениями функции  $u$  и в соответствующих точках разностной сетки (*истинное решение уравнения будет выдано преподавателем после выполнения расчётов по явной и неявной разностным схемам*).

# Выполнение задачи

## Задание 1

Записать неявную разностную схему:

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

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

## Задание 2

Определить порядок аппроксимации разностной схемы уравнения 1: Для этого запишу разложение значений  $u_j^{n+1}$ ,  $u_{j+1}^{n+1}$ ,  $u_{j-1}^{n+1}$  в ряд Тейлора относительно точки  $(t^{n+1}, x_j)$ :

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

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

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

Подставляя зависимости уравнения 2 - уравнения 4 в разностную схему уравнения 1, получаю:

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

Таким образом, неявная разностная схема уравнения 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

Доказать абсолютную устойчивость разностной схемы уравнения 1 (с помощью метода гармоник):

Представляю решение разностной схемы в виде гармоник:

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

Подставляя уравнения 5 в разностную схему уравнения 1, получаю:

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

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

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

Преобразую комплексные числа из экспоненциальной формы в тригонометрическую:

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

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  $\lambda$ :

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

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

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

В полученном двойном неравенстве левое и правое условие выполняются автоматически.

Для любых значений  $\Delta t$  и  $h$  неравенство выполняется. Следовательно, разностная схема **абсолютно устойчива**.

## Задание 4

Привести схему к виду, удобному для использования метода прогонки:

Преобразую неявную разностную схему уравнения 1, группируя в левой части члены, содержащие значение функции  $u(t, x)$  на  $(n + 1)$  шаге по времени, а в правой части - все остальные члены:

$$-\frac{\Delta t}{h^2}u_{j+1}^{n+1} + \left(1 + 2\frac{\Delta t}{h^2}\right)u_j^{n+1} - \frac{\Delta t}{h^2}u_{j-1}^{n+1} = u_j^n. \quad (6)$$

Введу следующие обозначения:

$$a_j = -\frac{\Delta t}{h^2}; b_j = \left(1 + 2\frac{\Delta t}{h^2}\right); c_j = -\frac{\Delta t}{h^2}; \xi_j^n u_j^n. \quad (7)$$

С учётом обозначений уравнения 7 равенство уравнения 6 будет иметь вид:

$$a_j u_{j+1}^{n+1} + b_j u_j^{n+1} + c_j u_{j-1}^{n+1} = \xi_j^n$$

Данное преобразование называется *преобразованием неявной разностной схемы к виду, удобному для использования метода прогонки*.

## Задание 5

Проверить сходимость прогонки:

**Теорема.** Достаточным условием сходимости метода прогонки к решению исходной дифференциальной задачи является выполнение неравенства:

$$|a_j| + |c_j| < |b_j|$$

Легко видеть, что для разностной схемы достаточное условие сходимости прогонки выполняется:

$$|a_j| + |c_j| = 2\frac{\Delta t}{h^2} < 1 + 2\frac{\Delta t}{h^2} = |b_j|$$

## Задание 6

Найти  $\alpha_1, \beta_1, u_N^{n+1}$ :

Для реализации неявной разностной схемы требуется ввести некоторое дополнительно условие, связывающее значения функции  $u(t, x)$  на  $(n+1)$ -м шаге по времени. Представлю это дополнительное условие в виде линейной зависимости

$$u_j^{n+1} = \alpha_j u_{j+1}^{n+1} + \beta_j, \quad (8)$$

справедливой для любого значений  $j = 1, \dots, N-1$ .

Соотношение уравнения 8 называют **рекуррентным прогоночным соотношением**, а коэффициенты  $\alpha_j, \beta_j$  - **прогоночными коэффициентами**.

Для определения прогоночных коэффициентов на 1-м шаге по координате  $x$ , используя рекуррентное прогоночное соотношение уравнения 8, записанное для  $j = 1$ :

$$u_1^{n+1} = \alpha_1 u_2^{n+1} + \beta_1,$$

и левое граничное условие:

$$u_1^{n+1} = e^{(n+1)\Delta t}$$

Сравнивая эти два соотношения, получаю:

$$\alpha_1 = 0, \beta_1 = e^{(n+1)\Delta t}.$$

Значение функции  $u(t, x)$  на  $(n+1)$ -м шаге по времени в крайней правой точке, которое можно определить из правого граничного условия:

$$u_N^{n+1} = e^{(n+1)\Delta t+1}.$$

## Задание 7

Записать рекуррентное прогоночное соотношение:

Соотношение уравнения 8 является **рекуррентным прогоночным соотношением**.

## Задание 8

Составить алгоритм (блок-схему) расчёта:

