

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Факультет вычислительной математики и кибернетики

**Численное решение трёхмерного волнового
уравнения
с различными граничными условиями**

Выполнила:
Яркова Юлия Сергеевна
группа 622

Москва
2025

Математическая постановка дифференциальной задачи

В трёхмерной замкнутой области

$$\Omega = [0 \leq x \leq L_x] \times [0 \leq y \leq L_y] \times [0 \leq z \leq L_z]$$

для $0 < t \leq T$ требуется найти решение $u(x, y, z, t)$ уравнения в частных производных

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \Delta u, \quad (1)$$

с начальными условиями

$$u|_{t=0} = \varphi(x, y, z), \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad (3)$$

и граничными условиями варианта 5:

$$\begin{aligned} u(0, y, z, t) &= u(L_x, y, z, t), & \frac{\partial u}{\partial x}(0, y, z, t) &= \frac{\partial u}{\partial x}(L_x, y, z, t), \\ u(x, 0, z, t) &= 0, & u(x, L_y, z, t) &= 0, \\ u(x, y, 0, t) &= 0, & u(x, y, L_z, t) &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Для численного решения задачи введём на Ω сетку $\omega_{h\tau} = \bar{\omega}_h \times \omega_\tau$, где

$$\bar{\omega}_h = \{(x_i = ih_x, y_j = jh_y, z_k = kh_z), \ i, j, k = 0, 1, \dots, N\},$$

$$h_x N = L_x, \ h_y N = L_y, \ h_z N = L_z,$$

$$\omega_\tau = \{t_n = n\tau, \ n = 0, 1, \dots, K, \ \tau K = T\}.$$

Аппроксимируем уравнение (1) явной разностной схемой:

$$\frac{u_{ijk}^{n+1} - 2u_{ijk}^n + u_{ijk}^{n-1}}{\tau^2} = a^2 \Delta_h u_{ijk}^n, \quad (x_i, y_j, z_k) \in \omega_h, \ n = 1, 2, \dots, K-1,$$

где Δ_h — семиточечный разностный аналог оператора Лапласа:

$$\Delta_h u_{ijk}^n = \frac{u_{i-1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i+1,j,k}^n}{h_x^2} + \frac{u_{i,j-1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j+1,k}^n}{h_y^2} + \frac{u_{i,j,k-1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k+1}^n}{h_z^2}.$$

Начальные условия аппроксимируем следующим образом:

$$u_{ijk}^0 = \varphi(x_i, y_j, z_k), \quad (x_i, y_j, z_k) \in \omega_h, \quad (5)$$

$$u_{ijk}^1 = u_{ijk}^0 + a^2 \frac{\tau^2}{2} \Delta_h \varphi(x_i, y_j, z_k), \quad (x_i, y_j, z_k) \in \omega_h. \quad (6)$$

Граничные условия варианта 5 аппроксимируются на сетке:

$$\begin{aligned} u_{0jk}^{n+1} &= u_{Njk}^{n+1}, & u_{1jk}^{n+1} &= u_{N+1jk}^{n+1}, \\ u_{i0k}^{n+1} &= 0, & u_{iNk}^{n+1} &= 0, \\ u_{ij0}^{n+1} &= 0, & u_{ijN}^{n+1} &= 0, \end{aligned}$$

для $i, j, k = 0, 1, \dots, N$.

Постановка задачи для варианта 5

Исходные данные

- Граничные условия:
 - По x : периодические
 - По y : первого рода (однородные)
 - По z : первого рода (однородные)
- Аналитическое решение:

$$u_{\text{analytical}} = \sin\left(\frac{2\pi}{L_x}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{L_y}y\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{L_z}z\right) \cdot \cos(a_t t + 2\pi),$$

где

$$a_t = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{L_x^2} + \frac{1}{L_y^2} + \frac{1}{L_z^2}}, \quad a^2 = \frac{1}{4\pi^2}.$$

- Начальная функция:

$$\varphi(x, y, z) = u_{\text{analytical}}(x, y, z, 0) = \sin\left(\frac{2\pi}{L_x}x\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{L_y}y\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{L_z}z\right).$$

- Параметры:
 - L_x, L_y, L_z — размеры области (варианты: все равны 1 или π)
 - T — конечное время
 - N — число узлов по каждому направлению
 - K — число шагов по времени (около 20 шагов)

-

Требуется:

Задание состоит в том, чтобы расширить имеющуюся программу в последнем задании с использованием MPI+CUDA/MPI+OpenACC/CDVMH

Реализация задания 4 с использованием CUDA

В данной программе реализовано численное решение трёхмерного волнового уравнения в кубической области с использованием гибридной параллельной технологии MPI + CUDA. Расчётная область по координатам x , y и z разбивается между MPI-процессами с помощью декартовой топологии, при этом каждому процессу соответствует свой локальный поддомен с добавлением призрачных слоёв для обмена граничными значениями. Внутри каждого MPI-процесса вычисления выполняются на GPU.

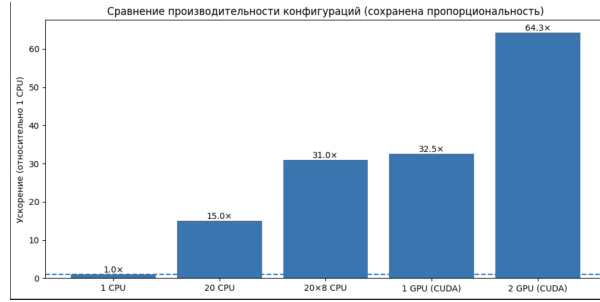


Рис. 1: Enter Caption

Начальные условия и граничные условия задаются на основе известного аналитического решения, что позволяет на каждом временном шаге оценивать максимальную погрешность численного решения. Первый и второй временные слои вычисляются отдельными CUDA-ядрами, после чего используется стандартная конечно-разностная схема второго порядка по времени. На каждом шаге времени выполняется обмен граничными слоями между соседними процессами по всем трём направлениям с помощью неблокирующих операций MPI. Для процессов, расположенных на границе всей области, граничные значения восстанавливаются напрямую из аналитического решения.

В процессе моделирования программа выводит максимальную ошибку относительно аналитического решения для каждого временного шага, а по завершении вычислений измеряется и выводится общее время выполнения (максимальное по всем MPI-процессам). Таким образом, программа демонстрирует корректность численного метода и эффективность параллельных вычислений на распределённой системе с использованием GPU.

Таблица 1: Сравнение производительности MPI и GPU

Число нитей	Число GPU	Время t , сек	Ускорение S	Погрешность ψ	
1	—	—	122.561	1.000	4.94e-7
20	—	—	7.753	15.808	4.94e-7
20	8	—	3.387	36.181	4.94e-7
1	—	1	3.103	39.506	4.94e-7
2	—	2	1.756	69.786	4.94e-7