

# Глава 1

## Постановка задачи

Необходимо решить уравнение переноса с дробной производной Римана-Лиувилля по времени:

$$\begin{cases} D_t^\alpha c + uc_x = f(x, t) \\ J_t^{1-\alpha} c|_{t=0} = \phi(x) \\ c|_{x=0} = \psi(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

Простейший случай предполагает  $u = u(x)$ .

## Глава 2

### Численное решение

#### 2.1 Преобразования системы

Численный расчет исходного уравнения проблематичен, так как в момент  $t = 0$  в уравнении присутствует интегрируемая особенность (сингулярность). Поэтому производится преобразование:

$$w = J_t^{1-\alpha} c - \phi(x), \quad (2.1)$$

$$c = D_t^{1-\alpha} (w + \phi(x)) = D_t^{1-\alpha} w + \phi(x) \frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \quad (2.2)$$

Тогда система принимает вид

$$\begin{cases} w_t + u \left( D_t^{1-\alpha} (w + \phi(x)) \right)_x = f(x, t) \\ w|_{t=0} = 0 \\ D_t^{1-\alpha} (w + \phi(x))|_{x=0} = \psi(t) \end{cases} \quad (2.3)$$

или

$$\begin{cases} w_t + u \left( D_t^{1-\alpha} w \right)_x = f(x, t) - \phi_x(x) \frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \\ w|_{t=0} = 0 \\ D_t^{1-\alpha} w|_{x=0} = \psi(t) - \phi(0) \frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \end{cases} \quad (2.4)$$

#### 2.2 Численная схема

На текущий момент реализована неявная численная схема второго порядка точности по пространству.

Далее временные слои обозначены верхним индексом  $n$ ,  $n = 0, 1, \dots$ , где  $n = 0$  соответствует начальному состоянию системы. Пространственные координаты обозначены через нижний индекс  $i$ ,  $i = \overline{0, nx}$ , где  $i = 0$  соответствует левой границе расчетной области,  $i = nx$  — правой.

Обозначим  $\tilde{w}_i^n = D_t^{1-\alpha} w|_{t=t^n}$  — вычисленная на временном шаге  $n$  в точке  $i$  производная Римана-Лиувилля поля  $w$  по времени.

Тогда схема выглядит следующим образом

$$\frac{w_0^{n+1} - w_0^n}{\Delta t} + u_i \frac{\tilde{w}_1^{n+1} - \left( \psi^{n+1} - \phi_0 \frac{(t^{n+1})^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \right)}{\Delta x} = f_0^{n+1} - \phi'_0 \frac{(t^n)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, \quad (2.5)$$

$$\frac{w_i^{n+1} - w_i^n}{\Delta t} + u_i \frac{\tilde{w}_{i+1}^{n+1} - \tilde{w}_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} = f_i^{n+1} - \phi'_i \frac{(t^n)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, \quad i = \overline{1, nx-1} \quad (2.6)$$

$$\frac{w_{nx}^{n+1} - w_{nx}^n}{\Delta t} + u_i \frac{\tilde{w}_{nx}^{n+1} - \tilde{w}_{nx-1}^{n+1}}{\Delta x} = f_{nx}^{n+1} - \phi'_{nx} \frac{(t^n)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)}, \quad (2.7)$$

Вычисление  $\tilde{w}_i^n$  производится с использованием приближения Грюнвальда-Летникова

$$\tilde{w}_i^{n+1} = \sum_{k=0}^{\min(m, n+1)} \frac{(-1)^k}{\Delta t^\alpha} \binom{\alpha}{k} = \frac{w_i^{n+1}}{\Delta t^\alpha} + \sum_{k=1}^{\min(m, n+1)} \frac{(-1)^k}{\Delta t^\alpha} \binom{\alpha}{k} w_i^{n+1-k}, \quad (2.8)$$

где  $m$  — параметр «длины памяти», определяющий количество слагаемых в приближении.

Таким образом общий алгоритм на временном шаге  $n + 1$ :

$$\begin{aligned} w_i^{n+1} + \Delta t^{1-\alpha} u_i \frac{w_{i+1}^{n+1} - w_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} = \Delta t \left( w_i^n + f_i^{n+1} - \phi'_i \frac{(t^n)^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \right. \\ \left. - \frac{u_i}{2\Delta x} \sum_{k=1}^{\min(m, n+1)} \frac{(-1)^k}{\Delta t^\alpha} \binom{\alpha}{k} w_{i+1}^{n+1-k} \right. \\ \left. + \frac{u_i}{2\Delta x} \sum_{k=1}^{\min(m, n+1)} \frac{(-1)^k}{\Delta t^\alpha} \binom{\alpha}{k} w_{i-1}^{n+1-k} \right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

с заменой соответствующих слагаемых для граничных элементов.

Полученная матрица системы является трехдиагональной и решается методом прогонки