

# **ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЫМА ПРИ ЛЕСНОМ ПОЖАРЕ**

14 ноября 2024 г.

## 1. Введение

Лесные пожары являются значительным источником атмосферного загрязнения, выбрасывая крупные объемы дыма, содержащего угарный газ, сажу, и другие вредные вещества. Моделирование распространения дыма при лесных пожарах необходимо для прогнозирования влияния на окружающую среду и здоровье населения.

Целью работы является разработка трехмерной модели, описывающей распространение дыма от линейного источника, имитирующего зону лесного пожара. В работе учитываются физические процессы подъема горячего дыма, ветровой перенос, турбулентная и молекулярная диффузия.

## 2. Математическая модель

### 2.1 Основные уравнения

Концентрация дыма  $C(x,y,z,t)$  описывается уравнением переноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \cdot \nabla C = \nabla(D \nabla C) + Q,$$

где:

$C(x, y, t)$  - концентрация дыма в мг/м<sup>3</sup>,

$V = (u, v, w)$  - вектор скорости воздуха (м/с),

$D = 0.75 \text{ м}^2/\text{с}$  - эффективный коэффициент турбулентной диффузии (увеличен из-за интенсивной турбулентности над пожарами)

$Q$  - мощность линейного источника дыма, зависящая от интенсивности горения.

Дополнительный вклад в вертикальную составляющую скорости учитывает подъемную силу горячего дыма:

$$F_z = g \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad \Delta \rho = \rho_{air} - \rho_{smoke} ,$$

где:

температура дыма  $T_{дыма} = 800\text{K} = 526.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

температура окружающего воздуха  $T_{воздуха} = 300\text{K} = 26.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 2.2 Граничные и начальные условия

**Начальные условия:**

Концентрация дыма:  $C(x, y, z, 0) = 0$

Скорость ветра:  $u=4\text{ м/с}$ ,  $v=1\text{ м/с}$ ,  $w=0\text{ м/с}$  (горизонтальный слабый ветер)

**Граничные условия:**

Нижняя граница ( $z = 0$ ): нулевой поток вещества

Верхняя граница ( $z = 100\text{ м}$ ): свободный выход частиц ( $C = 0$  на границе)

Боковые границы: условие нулевого градиента на удалении ( $C \rightarrow 0$  при  $x, y \rightarrow \infty$ ).

## 3. Начальные параметры модели

**1) Источник загрязнения:**

Тип: линейный источник(горящая кромка пожара).

Координаты: пожар расположен вдоль линии  $x = 500\text{м}$  на высоте  $z_0 = 0\text{м}$

## **2) Область моделирования:**

Размеры: 1500м×1500м×100м.

Сетка: 100×100×50 узлов.

## **3) Метеоусловия:**

Скорость ветра:  $u = 4$  м/с, что соответствует средним условиям при пожарах в лесистой местности.

Турбулентность: коэффициент диффузии  $D$  увеличен до  $0.75$  м<sup>2</sup>/с из-за вихревых потоков над очагом горения.

## **4) Обоснование выбора параметров:**

Интенсивность выбросов  $Q = 300$  мг/(м·с) основана на данных по эмиссии дыма при интенсивных пожарах хвойных лесов.

Турбулентный коэффициент  $D = 0.75$  м<sup>2</sup>/с отражает сильную турбулентность при конвективном подъеме горячего воздуха.

Высота области моделирования (100 м) охватывает основной слой распределения дыма вблизи земной поверхности.

## **4. Численные методы**

Для численного решения задачи применяются методы конечных объемов (FVM) с временной дискретизацией  $\Delta t = 0,5$  с.

### **Алгоритм расчета:**

1. Скорость воздуха рассчитывается методом SIMPLE.
2. Уравнение переноса интегрируется с помощью схемы Рунге-Кутты второго порядка.

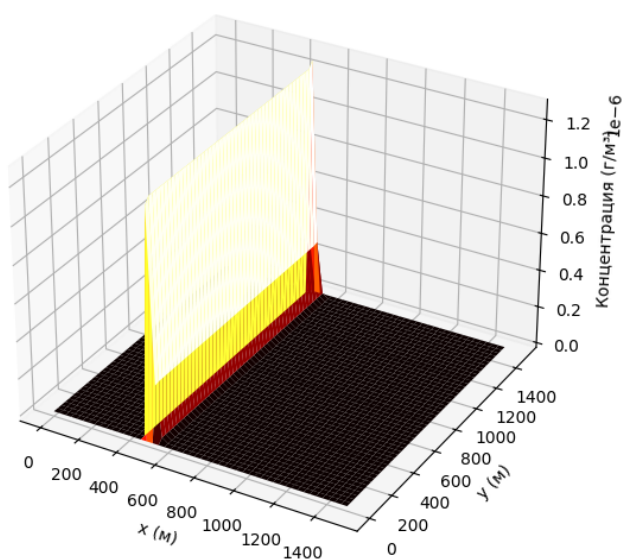
**Учет специфики линейного источника:** Линейный источник дискретизируется вдоль линии (x,y) с равномерным распределением мощности выбросов.

**Контроль устойчивости:** Для сходимости решения:

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq 1, \quad \Delta x = 10\text{м.}$$

## 5. Визуализация моделирования

Концентрация дыма на уровне 10 м, время: 3.0 сек



Вертикальное сечение дыма, время: 3.0 сек

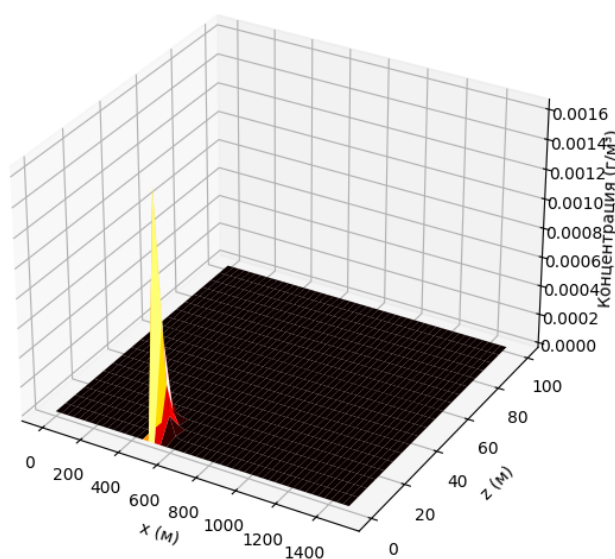
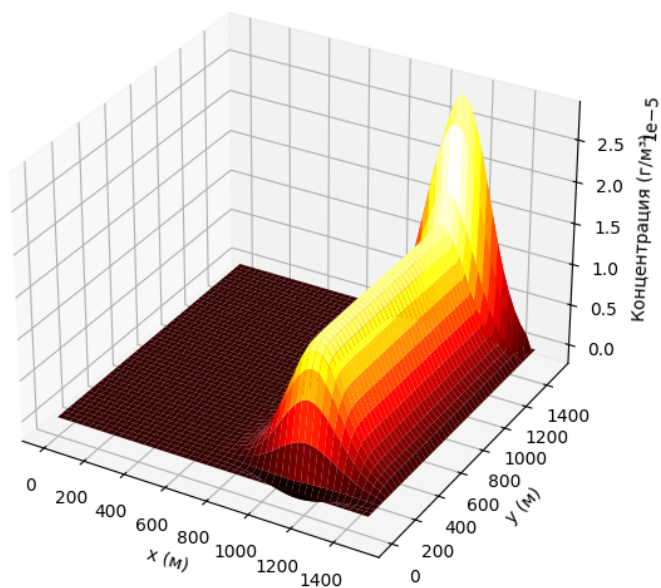


Рис. 1 - Слева: Концентрация дыма по осям **x,y** через 3 сек. после возникновения  
Справа: Концентрация дыма по осям **x,z** через 3 сек. после возникновения

Концентрация дыма на уровне 10 м, время: 150.0 сек



Вертикальное сечение дыма, время: 150.0 сек

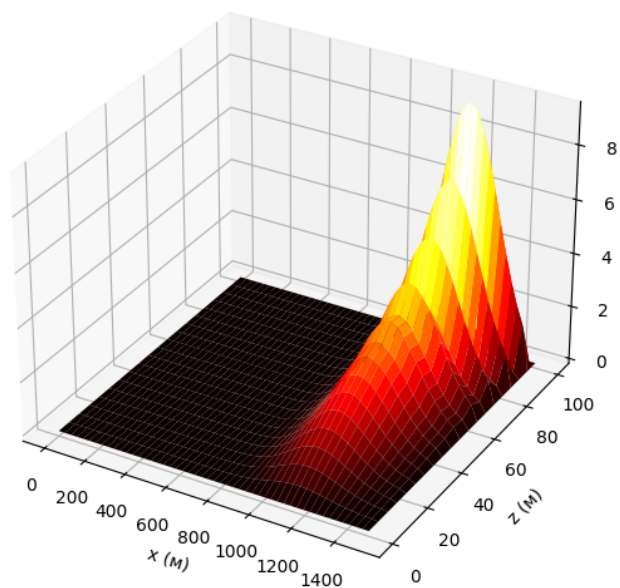
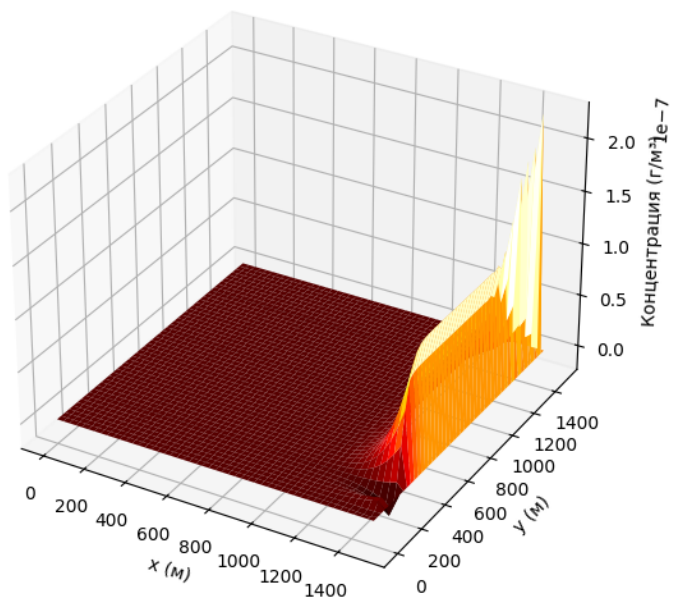


Рис. 2 - Слева: Концентрация дыма по осям  $x, y$  через 150 сек. после возникновения

Справа: Концентрация дыма по осям  $x, z$  через 150 сек. после возникновения

Концентрация дыма на уровне 10 м, время: 299.0 сек



Вертикальное сечение дыма, время: 299.0 сек

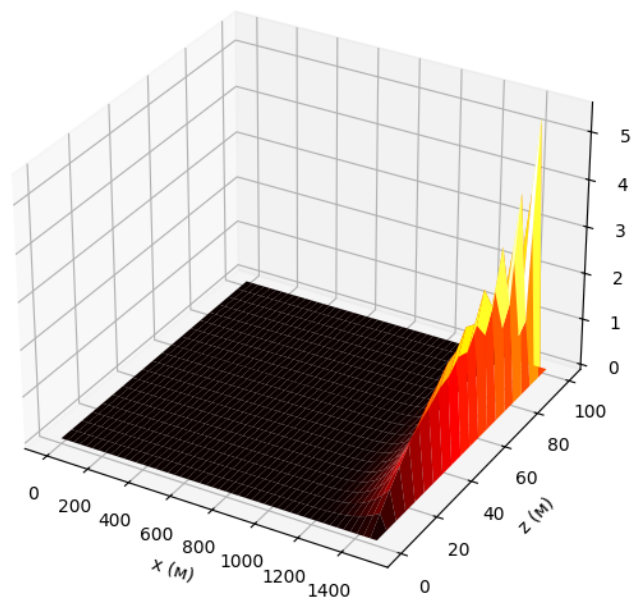


Рис. 3 - Слева: Концентрация дыма по осям  $x, y$  за 1 сек. до конца рассмотрения

Справа: Концентрация дыма по осям  $x, z$  за 1 сек. до конца рассмотрения

Эти графики позволяют визуально проследить эволюцию распределения дыма с течением времени:

1. На ранних этапах выбросы остаются сосредоточенными вблизи источника.
2. С увеличением времени видна динамика распространения дыма вдоль направления ветра, а также влияние подъемных потоков и диффузии, которые растягивают область высокой концентрации вверх и вширь.
3. Графики демонстрируют, как скорость ветра, диффузия, и изменения температуры с высотой влияют на движение и распределение выбросов.

## **6. Заключение**

Разработанная модель учитывает специфические параметры линейного источника, соответствующего лесному пожару. Начальные условия и параметры выбраны с учетом данных реальных пожаров, что позволяет адаптировать модель для прогнозирования распространения дыма в лесной зоне. Представлены результаты моделирования, включая профили концентрации и динамику распространения.

## 7. Ссылки

1. Общая информация о модели адвекции-диффузии: [https://en.wikipedia.org/wiki/Convection–diffusion\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Convection–diffusion_equation)
2. Численные методы для решения уравнений переноса:  
Литература по численным методам в математической физике:  
"Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing" (William H. Press et al.)  
"Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations" (Randall J. LeVeque)
3. "A Lagrangian particle model for simulating the dispersion of air pollutants" (Atmospheric Environment, 2002).
4. «ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТУМАНА В ВОЗДУШНОМ БАССЕЙНЕ НАД ВОДОХРАНИЛИЩЕМ», Е. В. Квон, Г. С. Ривин, Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия, 2001