

## Список информационных источников

1. В.В. Меньшиков, А.А. Швыряев Опасные химические объекты и техногенный риск // Учебное пособие. – М.: Изд-во Химия, фак. Моск. ун-та, 2003. – 254 с.

2. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. // Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности автогазозаправочных станций газомоторного топлива". – Приказ от 11 декабря 2014 года N 559.

3. Дементьев В. Международный научно-технический журнал Авто газозаправочный комплекс // журнал. – Изд-во ООО «АГЗК +АТ», 2009. – 96с.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЕТРА

*Сартбаев М.Ж.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Перминов В.А., д. ф.-м.н., профессор кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности*

Математическая модель для описания процессов тепло- и массопереноса и прогнозирования скорости, температуры и концентрации радиоактивных загрязняющих веществ распространяющихся под действием ветра построена в результате анализа известных экспериментальных данных и используя концепцию и методы механики реагирующих сред [1] и существующих моделей загрязнения окружающей среды. Пыль, содержащая радиоактивные частицы, может подниматься под действием воздушных потоков и переносится на значительные расстояния. Считается, что 1) течение носит развитый турбулентный характер, молекулярным переносом пренебрегают, 2) плотность газообразной фазы не зависит от давления из-за низкой скорости потока по сравнению с со скоростью звука, 3) оседание частиц подчиняется закону Стокса. Рассмотрим задачу для двух координат: горизонтальной и перпендикулярной к земной поверхности вертикальной составляющей. Кроме того, предположение о двумерной конфигурации может быть оправдано, учитывая, что длина загрязненных участков может быть достаточно большой. Для описания конвективного переноса, мы используем уравнения Рейнольдса для турбулентного течения. Участок, с которого

поднимаются загрязняющие вещества моделируется как плоский источник выделения радиоактивных примесей.

## 2. Постановка задачи

Предложим следующую модель исследования (Рис. 1 – модель участка длиной  $l$ , содержащего загрязняющие радиоактивные примеси). Пусть координаты точки отсчета  $x_1, x_2 = 0$  будут расположены в середине плоскости данного участка на высоте уровня шероховатости. Ось  $Ox_2$  направлена вертикально, ось  $Ox_1$ , направлена параллельно земной поверхности в направлении невозмущенной скорости ветра.

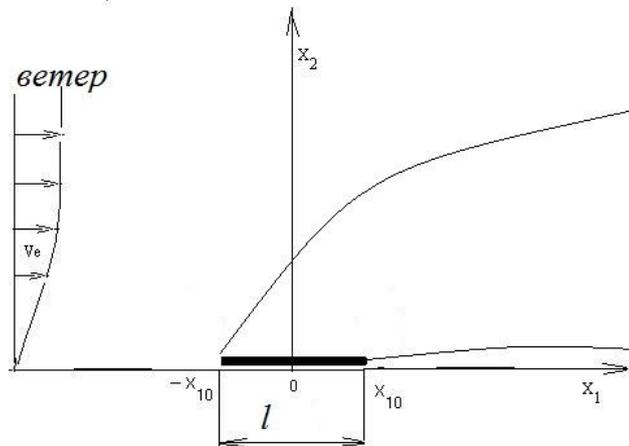


Рис.1 Схема расчетной области.

Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений (1)-(5) с использованием начальных и граничных условий и локально-равновесной модели турбулентности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0, \quad j=1,2, \quad i=1,2; \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v_i' v_j'}) - \rho s c_d v_i |\vec{v}| - \rho g_i; \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p \overline{v_j' T'}) - v_2 (\rho_e g + c_p \rho \frac{dT_e}{dx_2});$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v_j' c_\alpha'}), \quad \alpha=1,2; \quad (4)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, \quad P_e = \rho RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \quad \frac{dT_e}{dx_2} = \gamma_e. \quad (5)$$

Представленная выше система дифференциальных уравнений решалась учетом следующих начальных и граничных условий:

$$t = 0: v_1 = 0, v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, T_s = T_e; \quad (6)$$

$$x_1 = -x_{1e}: v_1 = V_e(x_2), v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}; \quad (7)$$

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0; \quad (8)$$

$$x_2 = 0: v_1 = 0, v_2 = V_{20}, T = T_0, c_\alpha = c_{\alpha 0}, |x_1| \leq x_{10}, \quad (9)$$

$$v_1 = 0, v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, |x_1| > x_{10};$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0. \quad (10)$$

Где  $d/dt$  – это символ полной производной:

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + (v_2 - v_s) \frac{\partial}{\partial x_2}; \quad v_s = \frac{gd}{18\nu} \left( \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right);$$

$t$  – время;  $x_i, v_i$ , ( $i = 1, 2$ ) – декартовы координаты и компоненты скорости;  $\rho$  – плотность газа – дисперсной фазы,  $T$  – температура;  $P$  – давление;  $c_p$  – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;  $c_\alpha$  – массовые концентрации ( $\alpha=1-O_2$ ,  $2$ –радиоактивные частицы,  $3$  – инертные компоненты воздуха;  $V_e$  – скорость ветра, заданная на высоте  $x_2=1,5$  м;  $R$ – универсальная газовая постоянная;  $M_\alpha$  – молекулярная масса  $\alpha$ -компоненты газовой фазы;  $g$ –ускорение свободного падения;  $\gamma_e$  – градиент стратификации температуры; индекс  $e$  соответствует невозмущенным параметрам среды.  $d$  – диаметр частиц пыли,  $\rho_s$  – плотность частиц пыли. Компоненты тензора турбулентных напряжений, а также турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты осредненного течения:

$$-\overline{\rho v_i v_j} = \mu_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij},$$

$$-\rho c_p v_j' T' = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad -\rho v_i' c_\alpha' = \rho D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_i}, \quad (11)$$

$$\lambda_t = \mu_t c_p / Pr_t, \quad \rho D_t = \mu_t / Sc_t, \quad \mu_t = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon,$$

$\mu_t, \lambda_t, D_t$  коэффициенты турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии соответственно;  $Pr_t, Sc_t$  – турбулентные

числа Прандтля и Шмидта, соответственно, которые равны 1.;  $K$  - турбулентная кинетическая энергия,  $\varepsilon$  - скорость диссипации турбулентной кинетической энергии. Коэффициент динамической турбулентной вязкости определяется с использованием локального равновесия модели турбулентности [1,2]. В размерном виде, коэффициент динамического турбулентной вязкости определяется с помощью выражения

$$\mu_t = \rho l^2 \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right)^2 - \frac{2}{3} \left[ \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right]^2 - \frac{g}{T \text{Pr}_t} \frac{\partial \theta}{\partial x_2} \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

Длина пути перемешивания определяется по формуле  $l = k_T x_2$ , где  $s k_T = 0.4$ ,  $\theta = T - T_e$ .

### 3. Численное решение и результаты

Краевая задача (1) - (10) решалась численно. Дискретный аналог для уравнений (1) - (10) был получен с помощью метода контрольного объема с использованием алгоритма SIMPLE [3]. Для проверки точности программы аналитические выражения для искомым функций были подставлены в (1) - (10) и уравнения были решены. Затем невязки считаются в качестве источников в каждом уравнении. Далее, с помощью алгоритма, описанного выше, значения используемых функций, были восстановлены с заданной точностью - не менее 1%. Эффект размеров контрольных объемов был изучен путем уменьшения их размера.

### Список информационных источников

1. Sedov L.G., *Mechanics of Continuous Medium*. – Moscow: Science. –1976.
2. Grishin A.M., *Mathematical Modeling Forest Fire and New Methods Fighting Them*. – Tomsk: Publishing House of Tomsk University Russia, – 1997.
3. Patankar S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, – New York: Hemisphere Publ. Co. – 1980.