

КОНФЕРЕНЦИЯ D

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ

ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ПРИМЕСИ В УЛИЧНОМ КАНЬОНЕ

А.В. Старченко, Е.А. Данилкин

Томский государственный университет

starch@math.tsu.ru, ugin@math.tsu.ru

Ключевые слова: вихреразрешающее моделирование турбулентности, уличный каньон.

В работе представлена нестационарная трехмерная вихреразрешающая модель, разработанная для исследования неизотермических турбулентных отрывных течений в уличных каньонах. Для параметризации турбулентности подсеточных масштабов используется градиентная модель Смагоринского. На основе проведенных расчетов показано влияние расположения источника примеси, размеров уличного каньона, скорости основного потока и температурного перепада на стенках на уровень загрязнения воздуха в каньоне.

Работа посвящена построению и апробации трехмерной вихреразрешающей микромасштабной математической модели, учитывающей влияние эффектов плавучести и шероховатости подстилающей поверхности для исследования турбулентных отрывных течений и процессов переноса примеси в уличных каньонах. Интерес представляет получение новой информации о влиянии тепловых режимов на структуру потока, изучение локальных особенностей изменения температуры и образования зон повышенных концентраций загрязнителей атмосферного воздуха в городских кварталах.

Физико-математическая постановка задачи. Рассматривается трёхмерное нестационарное турбулентное движение воздуха в уличном каньоне. Источники примеси постоянной интенсивности располагаются на дне уличного каньона. Геометрия области исследования представлена на рисунке 1.

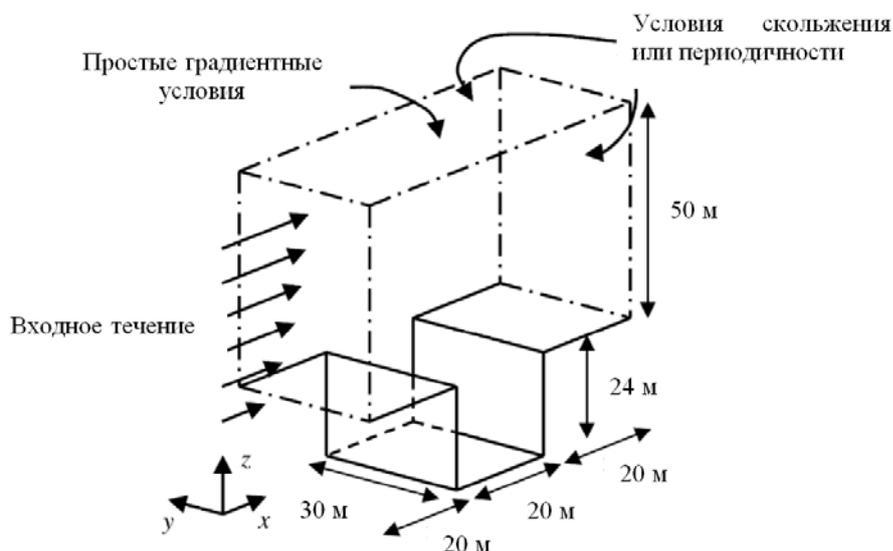


Рисунок 1 – Геометрия области исследования (уличный каньон глубиной 24 метра)

Математическая модель трехмерного нестационарного турбулентного движения несжимаемой среды включает в себя отфильтрованные уравнения неразрывности и уравнения Навье-Стокса в приближении Буссинеска [1].

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + g_i \frac{\bar{T} - T_0}{T_0}, i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

Здесь \bar{u}_i – отфильтрованные проекции мгновенного вектора скорости на оси координат, \bar{p}, \bar{T} – отфильтрованные значения давления и температуры, T_0 – относительное значение температуры; ν – кинематическая вязкость, ρ – плотность, τ_{ij} – тензор подсеточных турбулентных напряжений, g_i – проекции вектора ускорения свободного падения (0;0;9,81). По повторяющимся индексам j проводится суммирование.

Полученная система уравнений является незамкнутой и для ее замыкания используется подсеточная модель Смагоринского [1]:

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} \approx \tau_{ij}^{smag} = -\nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right), i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где ν_T – турбулентная вязкость. Турбулентная вязкость ν_T определяется средним значением скорости диссипации энергии турбулентности, приходящейся на единицу объема, и масштабом подсеточных вихрей [1]:

$$\nu_T = C_s^2 \Delta_g^2 |\bar{S}|, \quad (3)$$

где C_s – постоянная Смагоринского, $\Delta_g = h$ – шаг сетки модели, $|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$ – норма тензора скорости деформации.

Также математическая модель включает в себя отфильтрованные транспортные уравнения, описывающие перенос концентрации примеси и тепла:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\nu}{Sc} + \frac{\nu_T}{Sc_\tau} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) + S_{pol}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{\nu}{Pr} + \frac{\nu_T}{Pr_\tau} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) + S_{temp}, \quad (5)$$

где \bar{C} – концентрация примеси, Sc – число Шмидта, Sc_τ – турбулентное число Шмидта, \bar{T} – поле температуры, Pr – число Прандтля, Pr_τ – турбулентное число Прандтля, S – функция, описывающая распределение источников.

Для задания значений турбулентных параметров вблизи подстилающей поверхности и учета ее шероховатости используется метод пристенных функций [2].

Аппроксимация дифференциальной задачи и численный метод ее решения. Численное решение полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется на основе метода конечного объема с использованием разнесенной разностной сетки. Аппроксимация конвективных членов выполняется с использованием противопотоковой схемы MLU Ван Лира. Аппроксимация диффузионных членов осуществляется центрально-разностной схемой второго порядка. Для решения уравнений движения применяется явная схема Адамса-Бэшфорда. В результате получается разностная схема второго порядка аппроксимации по времени и пространству, являющаяся условно устойчивой.

В гидродинамической части модели для согласования полей скорости и давления используется схема предиктор-корректор, в соответствии с которой явная схема Адамса-Бэшфорда для уравнения движения выполняет функцию предиктора, а коррекция поля скорости выполняется на основе решения уравнения Пуассона для давления методом сопряженных градиентов (CG), предобусловленного методом Зейделя с красно-черным упорядочиванием.

Адекватность построенной математической модели и корректность работы параллельной MPI-программы проверены на целом ряде тестовых примеров, среди которых: обтекание цилиндра квадратного сечения, течение над шероховатой пластиной [2].

Моделирование течения в уличном каньоне. Рассматривалось течение в идеализированном городском каньоне. При задании граничных условий в поперечном направлении использовались условия скольжения с ограничением, что длина области в поперечном направлении больше чем размер самого большого вихря в каньоне. В продольном направлении использовались периодические граничные условия. Расчеты проводились на сетке 182x54x180 на суперкомпьютере ТГУ СКИФ Cyberia. Источник поступления примеси постоянной интенсивности располагался вблизи поверхности на высоте $h=0,125$ m. Расчеты (и осреднение величин) проводились в течение 240 с после времени инициализации, равного 200с.

Моделирование движения воздуха для исследуемого случая показало, что основной поток вовлекает во вращательное движение воздушные массы, находящиеся внутри уличного каньона (Рисунок 2), и задает направление и интенсивность возникающего вихревого движения. Примесь, поступающая от источников, расположенных на дне каньона, переносится возникшим вращательным движением к подветренной стороне каньона и далее отчасти выветривается,

попадая в основной поток, отчасти возвращается вращательным движением воздуха в область, ограниченную вертикальными стенками близко стоящих зданий.

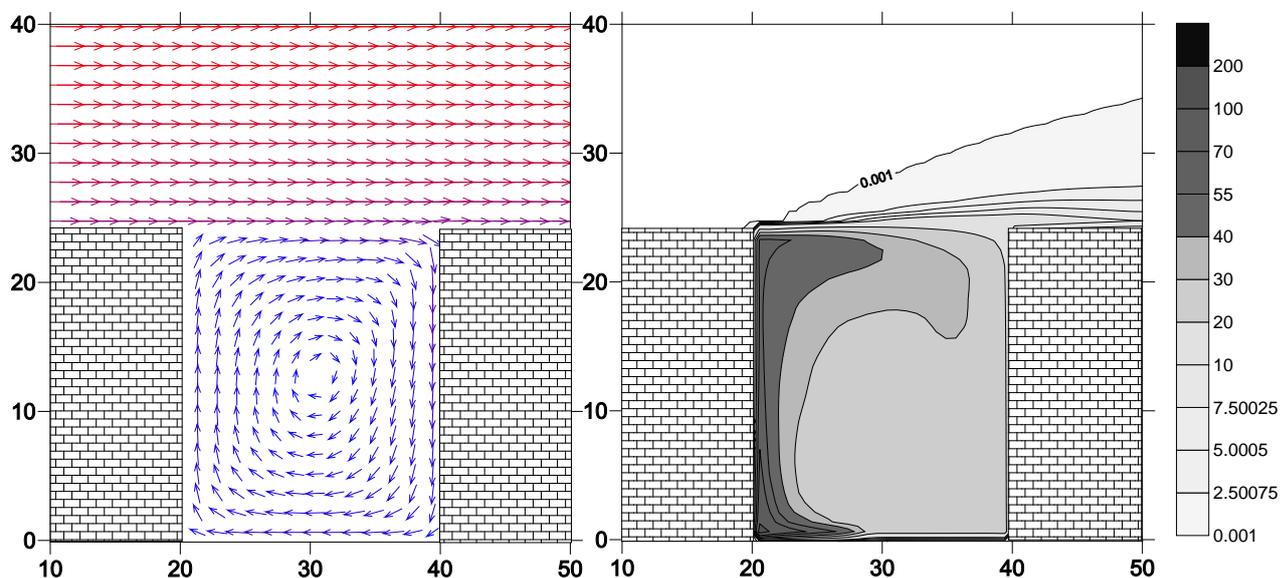


Рисунок 2 – Осредненное по времени векторное поле скорости и распределение концентрации в уличном каньоне

Заключение. Для исследования структуры течения и процессов переноса примеси в уличных каньонах разработана вихререзающая модель турбулентности, учитывающая влияние температурной неоднородности и шероховатость подстилающей поверхности.

На основе разработанной модели исследовано влияние расположения источника примеси, геометрических параметров уличного каньона, скорости основного потока, циркуляции нагретого вследствие температурной неоднородности на стенках каньона воздуха на уровень загрязнения.

Работа выполнена в рамках проекта Госзадания Министерства образования и науки РФ № 5.628.2014/К.

Список использованной литературы:

1. *Sagaut P.* Large eddy simulation for Incompressible Flow 3rd ed. An Series: Scientific Computation, 2006. XXIX. – 556 p.
2. *Danilkin E.A., Starchenko A.V.* High Performance Computation for Large Eddy Simulation // LNCS series, 2010.Vol.6083. P.163-172.