

УДК 519.6:504.3.054

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ПРИ ЗАСТРОЙКЕ ЖИЛЫХ РАЙОНОВ***Русакова Т.И. \*; д.т.н., проф. Беляев Н.Н. \*\***\*Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара,  
Днепропетровск**\*\*Днепропетровский национальный университет железнодорожного  
транспорта им. академика В. Лазаряна, Днепропетровск*

**Постановка проблемы.** Сейчас существует большой интерес к проблеме прогноза уровня загрязнения воздушной среды на улицах. В данной ситуации можно выделить две важные задачи. Первая задача – это загрязнение воздушной среды от транспорта, стационарных источников на улице (выбросы с миникотелен, от труб ресторанов, кафе и т.п.). Вторая задача – это прогноз загрязнения атмосферы на улицах, когда происходят аварийные выбросы (пожары на автозаправочных станциях, разгерметизация движущихся цистерн, аварийные разливы и т.д.). Поэтому возникает проблема создания эффективных математических моделей, которые могут быстро рассчитать степень загрязнения атмосферы на улицах для каждого класса задач.

**Анализ существующих решений.** В настоящее время используется несколько классов математических моделей для решения перечисленных задач. Как правило, это аналитические модели – модель Гаусса [2,8,9] и численные модели [1,2,3,11,12,13]. Аналитические модели позволяют оперативно рассчитать поле концентрации загрязняющего вещества, как для стационарных выбросов, так и для аварийных ситуаций. Большим недостатком этих моделей является то, что они не учитывают влияние зданий на улицах на процесс формирования зоны загрязнения. Необходимо отметить, что при использовании численных моделей, которые основаны на уравнениях Навье-Стокса требуется значительное количество компьютерного времени (порядка нескольких суток), что не позволяет применять эти модели для серийных расчетов [10].

Кроме этого, существует большая проблема моделирования турбулентности, так как общеизвестные модели турбулентности [10] дают достаточно плохие результаты при моделировании обтекания зданий. Также нужно отметить существующую нормативную методику [4], которая используется в Украине для расчета зон поражения с химически опасными веществами. Ее большим недостатком является также то, что она не учитывает влияние зданий на перенос загрязняющих веществ в атмосфере.

**Целью** данной работы является разработка CFD модели для расчета процесса загрязнения воздушной среды при застройке жилых районов, не требующей больших затрат компьютерного времени и применения мощных ПК при проведении серийных расчетов.

**Математическая модель.** Расчет переноса загрязняющих веществ на улицах, с учетом зданий разбивается на два шага. На первом шаге решается задача по определению поля скорости ветра при обтекании зданий (плановая задача). Для решения этой задачи применяется модель отрывных вихревых

течений идеальной несжимаемой жидкости [3]. В этом случае базовыми уравнениями являются: уравнение переноса завихренности (1) и уравнение Пуассона для расчета функции тока (2) [3]

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (2)$$

где  $\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$  – завихренность;  $\psi$  – функция тока;  $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ ,  $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$

Так как при отрыве потока, который происходит в угловых точках зданий, образуются вихри, то возникает задача расчета их интенсивности. Для решения этой задачи используется подход, рассмотренный в работе [3].

Для данных уравнений гидродинамики осуществляется постановка следующих граничных условий. Так, для уравнения Пуассона на поверхности препятствий ставится граничное условие «непротекания» [3]:  $\psi=0$ .

На границе входа воздушного потока в расчетную область задается профиль скорости воздушного потока  $u=f(y)$  и соответствующее значения функции тока  $\psi$  и завихренности  $\omega$ :  $\psi|_{\text{вход}}=\psi(y)$ ,  $\omega|_{\text{вход}}=\omega(y)$ .

На верхней границе расчетной области также ставится условие «непротекания»:  $\psi=\text{const}$ .

На границе выхода воздушного потока из расчетной области ставятся «мягкие» граничные условия, необходимые для замыкания разностных уравнений [3].

Решение стационарной гидродинамической задачи находится методом установления решения по времени. Для этого в начальный момент  $t=0$  для завихренности ставится начальное условие типа:  $\omega|_{t=0}=0$  или  $\omega|_{t=0}=\omega_0(x,y)$ .

После решения уравнений (1) и (2) и расчета поля скорости ветрового потока начинается решение задачи о переносе загрязняющих веществ на улицах (второй шаг). Для моделирования этого процесса используется уравнение переноса примеси в атмосфере [1,3,5]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества;  $u, v$  – компоненты вектора скорости ветра;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника выброса;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [3,5]. Для формирования вида расчетной области, положения зданий, их формы, используется метод маркирования расчетной области [1,3]. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке.

**Метод решения.** Для численного интегрирования уравнений гидродинамики используются неявные разностные схемы. Так для интегрирования уравнения переноса завихренности применяется попеременно-треугольная разностная схема [3,6].

Значение функции тока рассчитывается с помощью разностной схемы суммарной аппроксимации [6]. Численное интегрирование уравнения переноса примеси проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [1,3] по методу «бегущего счета».

**Практическая реализация модели.** На базе рассмотренной CFD модели был создан пакет прикладных программ (STREET-2), в качестве языка программирования используется Fortran. Разработанная модель была использована для решения следующей задачи. Рассматривается участок города, в рамках которого расположены 6 зданий (рис.1). Здания расположены несимметрично, возле первых двух зданий происходит залповый выброс загрязняющего вещества. Требуется рассчитать динамику загрязнения атмосферы вблизи зданий.

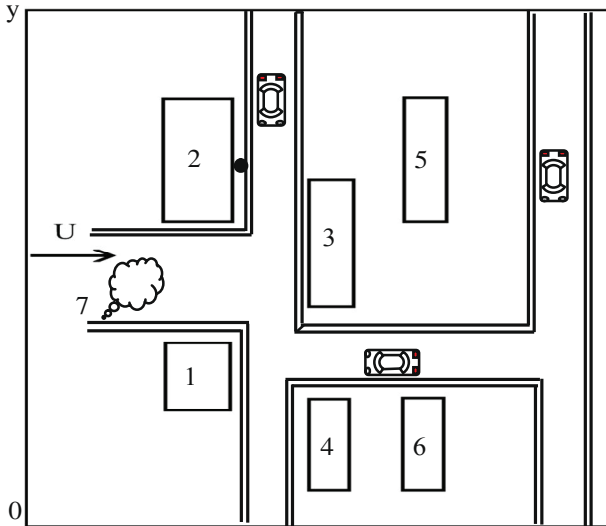


Рис.1. – Схема расчетной области: 1-6 – здания, 7 – место аварийного выброса

Исходные данные: размеры расчетной области 125м\*105м, скорость ветра 3.5 м/с, коэффициент турбулентной диффузии по всем направлениям принят  $2.5 \text{ м}^2/\text{с}$  [5]. Концентрация загрязнителя в облаке в начальный момент времени принята равной 1 (в безразмерном виде). На приведенных рисунках стрелкой показано направление ветра.

Рассмотрим результаты вычислительного эксперимента. На приведенных ниже рисунках показана динамика загрязнения атмосферы в районе для различных моментов времени. Эти данные позволяют оценить вид формирующейся зоны загрязнения, ее размеры и интенсивность.

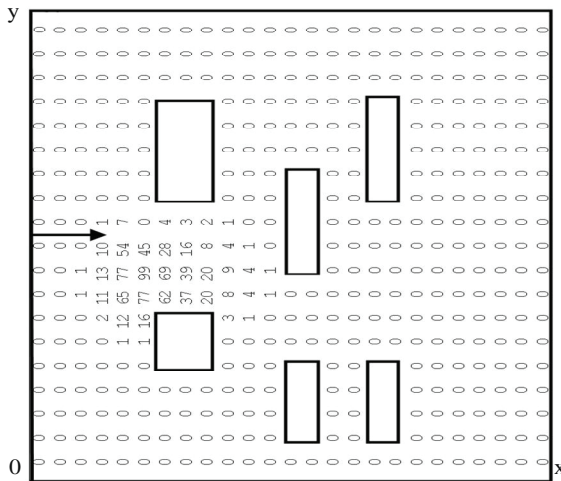


Рис. 2. – Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t=1.5c$  (максимальная концентрация  $C_{max}=0.566$ )

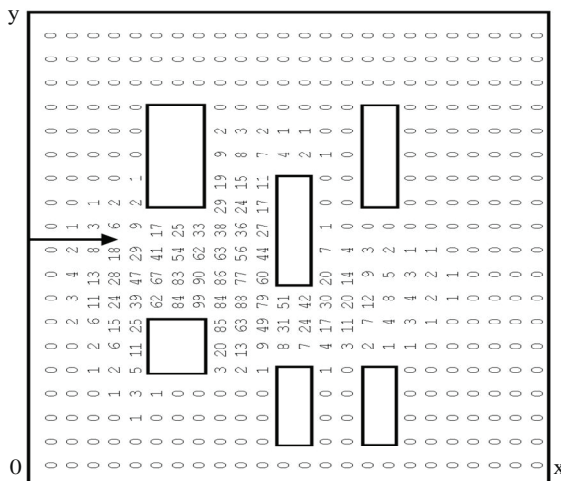


Рис. 3. – Зона загрязнения атмосфер для момента времени  $t=5c$  (максимальная концентрация  $C_{max}=0.185$ )

На этих рисунках значение концентрации представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать. Этот вывод результатов на печать эффективен при проведении серийных расчетов, когда осуществляется «перебор» различных вариантов с целью выбора наиболее оптимального для конкретной ситуации. Указанное представление результатов расчета в виде «целых» чисел позволяет оперативно анализировать информацию относительно величины концентрации в любой части расчетной области. Отметим, что по требованию пользователя, разработанный код осуществляет вывод на печать результатов по формату «действительное число», т.е. с сохранением дробной части числа.

Хорошо видно, как с течением времени формируется сложная зона загрязнения, вызванная влиянием зданий, своего рода препятствий, на процесс распространения загрязняющего вещества.

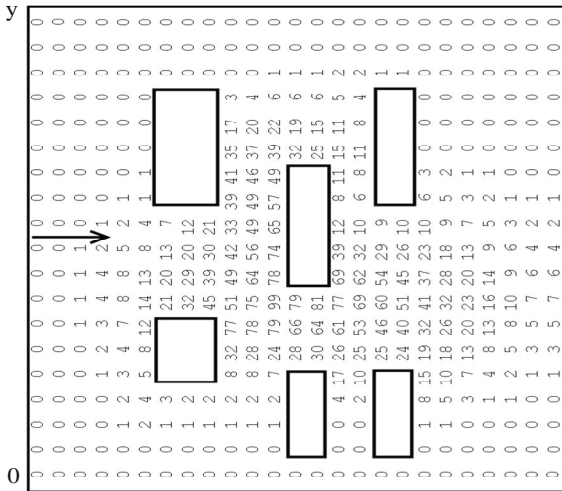


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t=9с$  (максимальная концентрация  $C_{max}=0.112$ )

Результаты данной задачи иллюстрируют возможность применения построенной численной модели для решения актуальных задач урбэкологии. На расчет задачи потребовалось 6с компьютерного времени.

**Выводы.** Рассмотрена эффективная CFD модель для прогноза уровня загрязнения атмосферы на улицах. Предложенная модель позволяет рассчитать гидродинамику ветрового потока при обтекании зданий и рассчитать динамику распространения загрязнителя на улицах. Отличительной чертой модели является оперативность ее реализации на ПК. Дальнейшее совершенствование

модели следует проводить в направлении ее адаптации к 3-D расчету рассеивания газов.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Антошкина Л.И. Моделирование аварийных ситуаций на промышленных объектах и безопасность жизнедеятельности / Л.И. Антошкина, Н.Н. Беляев, Л.Ф. Долина, Е.Д. Коренюк – Д: Нова ідеологія, 2011. – 123 с.
2. Бруязкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
3. Згуровский М.З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев Н.Н. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
4. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті / – К., 2001. – 33 с.
5. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 316с
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
7. Хміль Г.А. Концептуально-методичний апарат аналізу й оцінки техногенних та природних ризиків// Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. № 5, 2007. С. 47 – 55.
8. Шаталов А.А., Лисанов М.В. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46 – 52с.
9. Hanna S. Air Quality Modeling Over Short Distances.// College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling: 16 May-3 June 1994. №SMR/760-2 – P. 712 – 743.
10. Murakami S. Comparison of “k-ε” model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model / Murakami S., Mochida A., Yoshihiko H. // 8th Intern. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, July 8-11, 1991. – № 12 – 3.
11. Beliaiev N.N. Air Pollution Modelling of Technogenic Catastrophes caused by Terrorist Attacks on Rail Transport of Chemical Substances.// Simulation and Assessment of Chemical Processes in a Multiphase Environment . NATO Science for Peace and / Security Series. – C.: Environmental Security, Springer, 2007. P.327 – 336.
12. Biliaiev N.N., Kharytonov N.N. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography// Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September – 01 October, Torino, Italy, 2010. № P1.7.
13. Tedeschi G. Study of vertical transport of marine aerosol using an unsteady 2D model // Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and it's Application, 27 September – 01 October, Torino, Italy, 2010. № 4.9.