

## РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ НА УЛИЦАХ ГОРОДОВ

*Т. И. Русакова\**, асс., *Н. Н. Беляев\*\**, д. т. н., проф.

*\*Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара*

*\*\*Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*

**Ключевые слова:** загрязнитель, выброс вредного вещества, интенсивность, концентрация загрязняющего вещества, влияние зданий, завихренность, функция тока, численная модель, уравнение переноса примеси

**Постановка проблемы.** Прогнозирование качества воздушной среды на улицах является одной из важных прикладных задач. Однако это задача повышенной сложности, поскольку качество воздушной среды на улицах определяется совокупностью ряда факторов: метеоусловиями, характером расположения зданий в районе, интенсивностью выброса загрязняющих веществ от транспорта и т. д. Естественно, что построение моделей, позволяющих учесть все факторы, которые влияют на формирование зон загрязнения на улицах, невозможно. Более того, практическая реализация таких моделей потребовала бы применения сверхмощных компьютеров. Поэтому актуальным является создание прикладных моделей, позволяющих прогнозировать качество воздушной среды на улицах с учетом основных факторов переноса загрязняющих веществ.

**Анализ публикаций.** Традиционно для прогноза качества воздушной среды на улицах используется два класса моделей. Это модели Гаусса и их различные модификации [2; 6; 9] и CFD модели [1 – 8; 10; 11]. Модели Гаусса представляют собой достаточно эффективный инструмент решения прогнозных задач, поскольку они учитывают такие важные факторы: метеоусловия, интенсивность выброса, но не позволяют учесть влияние зданий на процесс распространения загрязняющих веществ на улицах. Известные CFD модели дают возможность учитывать влияние зданий на характер формирования зон загрязнения на улицах, но требуют для практической реализации очень мощных компьютеров и более двух суток времени расчета для прогноза уровня загрязнения воздушной среды только для небольшого микрорайона города. Это связано с тем, что данные модели основаны на уравнениях Навье – Стокса, а значит, для их реализации необходима мелкая сетка и дополнительные уравнения, чтобы описать процесс турбулентности. Реализация этих CFD моделей для случая, когда необходим серийный расчет различных сценариев загрязнения воздушной среды на улицах, в Украине невозможна.

**Целью** данной работы является разработка CFD модели прогноза загрязнения атмосферы на улицах, не требующей больших затрат компьютерного времени и применения мощных ПК при проведении серийных расчетов.

**Математическая модель.** В данной работе 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.

Компоненты вектора скорости ветрового потока рассчитываются так:

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

Будем считать, что отрыв потока происходит в угловых точках зданий. Так как при отрыве потока 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 скорость воздушного потока  $u$  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  $t$ . Для этого в начальный момент  $t = 0$  для завихренности ставится начальное условие типа:  $\omega|_{t=0} = 0$  или  $\omega|_{t=0} = \omega_0(x, y)$ .

Для расчета зон загрязнения на улицах при различных метеоусловиях и параметрах выброса загрязняющих веществ используется уравнение массопереноса [1; 3; 4]

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

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; 4].

Для формирования вида расчетной области, положения зданий, их формы используется метод маркирования расчетной области [1; 3]. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке. Используя данный метод, можно формировать любую форму зданий на улицах и выбирать их взаимное расположение.

**Метод решения.** Так, для интегрирования уравнения переноса завихренности применяется попеременно-треугольная разностная схема [3; 5]. Разностные уравнения для расчета завихренности на каждом шаге расщепления, имеют вид:

- на первом шаге расщепления

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^+ \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ \omega_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1}^+ \omega_{i,j} - v_{i,j}^+ \omega_{i,j-1}}{\Delta y} = 0,$$

- на втором шаге расщепления

$$\frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{u_{i+1,j}^- \omega_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^- \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1}^- \omega_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^- \omega_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} = 0,$$

$$\text{где } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}, \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Значение завихренности на каждом расчетном шаге рассчитывается по формуле «бегущего» счета.

Значение функции тока рассчитывается с помощью разностной схемы суммарной аппроксимации [5]. В этом случае разностные уравнения записываются так:

$$\text{- на первом шаге } \frac{\psi_{ij}^{n+\frac{1}{4}} - \psi_{ij}^n}{\Delta t} = \frac{\omega_{ij}}{2};$$

- на втором шаге 
$$\frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} = - \frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} - \frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2};$$

- на третьем шаге 
$$\frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{\psi_{i+1,j}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta x^2} + \frac{\psi_{i,j+1}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta y^2};$$

- на четвертом шаге 
$$\frac{\psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta t} = \frac{\bar{\omega}_{i,j}}{2}, \quad \bar{\omega}_{i,j} = \frac{1}{4}(\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j+1}\omega_{i-1,j-1} + \omega_{i,j-1}).$$

Численное интегрирование уравнения переноса примеси проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [1; 3].

Производная по времени аппроксимируется разделенной разностью «назад»

$$\frac{\partial c}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

В конвективных производных слагаемые однонаправленного переноса записываются в

виде: 
$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}.$$

С учетом предыдущего выражения конвективные производные аппроксимируются разделенными разностями «против потока» на верхнем временном слое

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \quad \frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \quad \frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Компоненты скорости  $u$  определяются на вертикальных гранях разностных ячеек, а компоненты скорости  $v$  – на горизонтальных гранях. Индексы этих граней соответствуют индексам ячеек, расположенных правее или выше соответствующей грани.

Вторые производные аппроксимируются следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

Здесь  $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$  – условные обозначения разностных операторов.

С учетом приведенных выше обозначений разностный аналог уравнения (3) записывается

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + L_{xx}^- C^{n+1} + L_{yy}^+ C^{n+1} + L_{yy}^- C^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij}$$

Обозначаем  $\delta_{ij}$  – число «1» или «0», в зависимости от того, расположен или нет в разностной ячейке « $ij$ » источник загрязнения. Значение  $q_{ij}$  равно интенсивности  $q_k$  соответствующего  $k$ -го источника, размещенного в разностной ячейке « $ij$ », деленной на площадь этой ячейки:  $q_{ij} = q_k / (\Delta x \cdot \Delta y)$ .

Расщепляем разностное уравнение на четыре разностных уравнения так, чтобы на каждом шаге учитывалось лишь одно направление переноса возмущений, определяемое знаком при конвективной производной. В этом случае разностные уравнения имеют вид:

- на первом шаге расщепления  $k = \frac{1}{4}$

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ;$$

- на втором шаге расщепления  $k = n + \frac{1}{2}, c = n + \frac{1}{4}$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ;$$

- на третьем шаге расщепления  $k = n + \frac{3}{4}, c = n + \frac{1}{2}$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l ;$$

- на четвертом шаге расщепления  $k = n + 1, c = n + \frac{3}{4}$

$$\frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l .$$

В данных разностных уравнениях используется значение интенсивности  $\bar{q}_l = \frac{q_l}{\Delta x \Delta y}$ .

Значение функции  $\delta_l$  тождественно равно нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса.

На основе рассмотренных разностных схем построена численная модель переноса загрязняющих веществ на улицах. Данная модель позволяет учитывать следующие факторы:

1. наличие зданий и их взаимное расположение в микрорайоне города;
2. скорость и направление ветра;
3. атмосферную диффузию;
4. местоположение и интенсивность выброса загрязняющего вещества.

Необходимо отметить, что построенная численная модель может быть использована для решения как традиционных задач в области экологической безопасности – выброс от автотранспорта, так и для задач аварийного загрязнения атмосферы на улицах.

**Практическая реализация модели.** На базе разработанной CFD модели произведен расчет уровня загрязнения воздушной среды в районе города (рис.1). Расчет выполнялся при следующих данных:

- длина расчетной области 250 м;
- ширина расчетной области 210 м;
- интенсивность выброса CO составляет 0,009 г/(с·м).

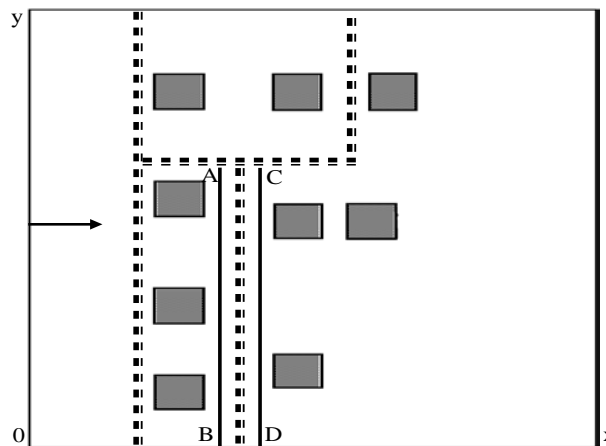


Рис.1. Схема расчетной области:

■ ■ ■ ■ положение автомагистрали; AB, CD – участки улицы

Рассмотрены две метеорологические ситуации:

1. Скорость ветра 4 м/с, коэффициенты диффузии  $\mu_x = \mu_y = 2 \text{ м}^2/\text{с}$ ;
2. Скорость ветра 1 м/с, коэффициенты диффузии  $\mu_x = \mu_y = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$ .

Отметим, что второй сценарий ( $U = 1 \text{ м/с}$ ) соответствует неблагоприятной метеорологической ситуации, близкой к штилю, при которой происходит резкое ухудшение экологической обстановки на улицах.

Результаты моделирования представлены на приведенных ниже рисунках, где стрелкой показано направление ветра. На рисунках 2 – 4 показана динамика загрязнения атмосферы в данном районе для различных моментов времени, соответствующая первой метеоситуации.

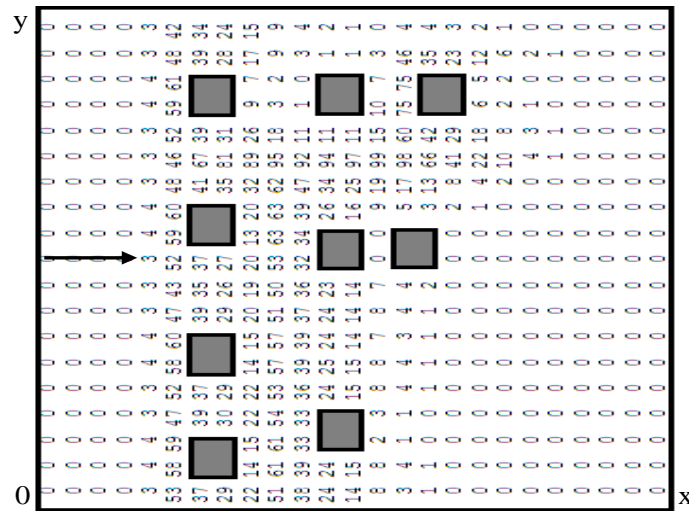


Рис. 2. Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t=5 \text{ с}$  (максимальная концентрация  $C_{max} = 3,65 \text{ мг/м}^3$ ,  $U=4 \text{ м/с}$ ,  $\mu_x=\mu_y=2 \text{ м}^2/\text{с}$ )

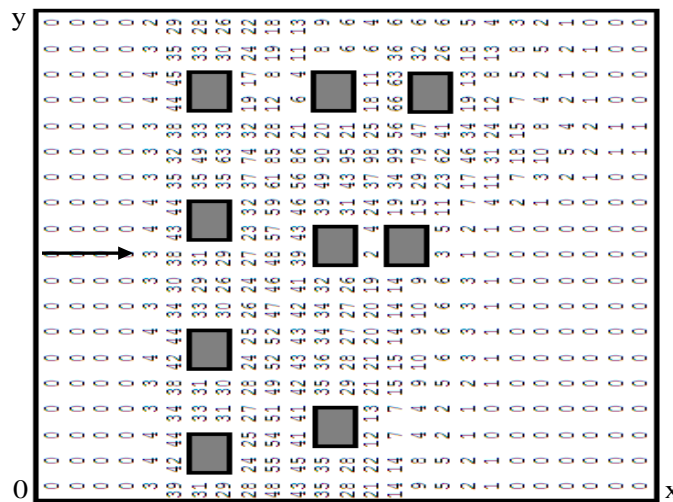


Рис. 3. – Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t = 10 \text{ с}$  (максимальная концентрация  $C_{max} = 6,21 \text{ мг/м}^3$ ,  $U = 4 \text{ м/с}$ ,  $\mu_x = \mu_y = 2 \text{ м}^2/\text{с}$ )

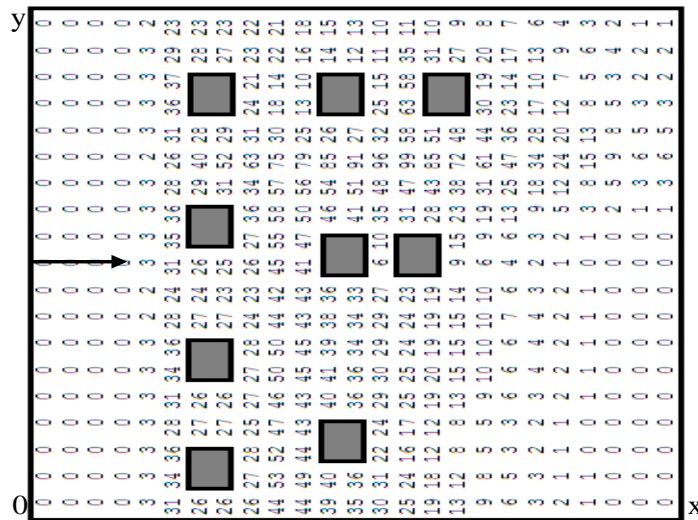


Рис. 4. Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t = 15 \text{ с}$   
(максимальная концентрация  $C_{\text{max}} = 8,05 \text{ мг/м}^3, U = 4 \text{ м/с}, \mu_x = \mu_y = 2 \text{ м}^2/\text{с}$ )

На рисунках 5 – 7 показана динамика загрязнения атмосферы в данном районе для различных моментов времени, соответствующая второй метеоситуации, которая моделирует неблагоприятные атмосферные условия.

Отметим, что 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. Это значит, что если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет 7,6 % от максимальной концентрации на входе в помещение, то на печать будет выведено число 7. Этот вывод результатов на печать эффективен при проведении серийных расчетов, когда осуществляется «перебор» различных вариантов с целью выбора наиболее оптимального для конкретной ситуации.

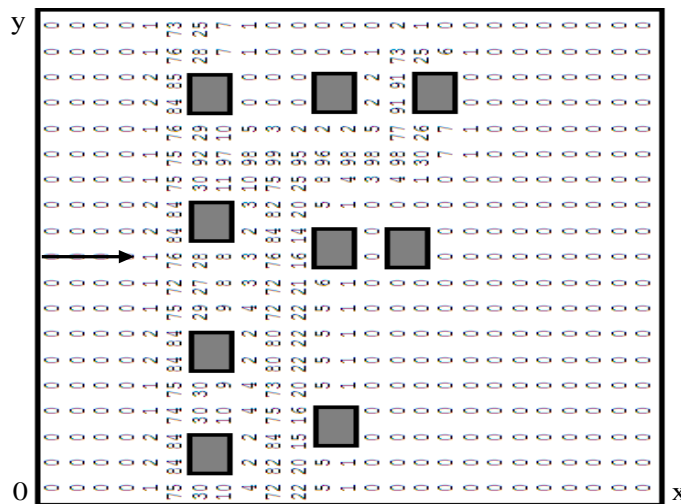


Рис. 5. Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t = 5 \text{ с}$   
(максимальная концентрация  $C_{\text{max}} = 4,27 \text{ мг/м}^3, U = 1 \text{ м/с}, \mu_x = \mu_y = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$ )

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.

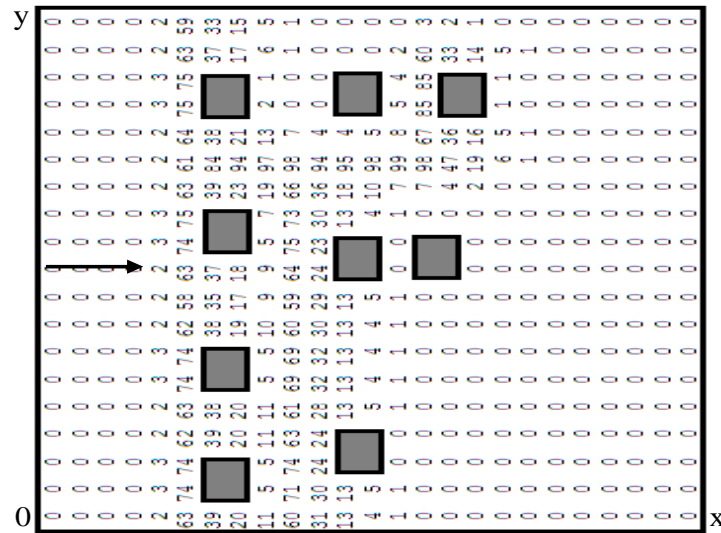


Рис. 6. Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t = 10$  с (максимальная концентрация  $C_{max} = 8,12$  мг/м<sup>3</sup>,  $U = 1$  м/с,  $\mu_x = \mu_y = 0,5$  м<sup>2</sup>/с)

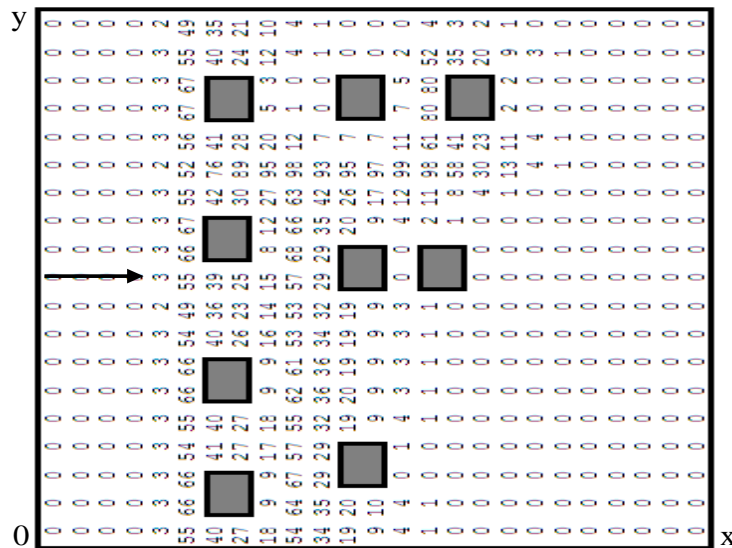


Рис. 7. Зона загрязнения атмосферы для момента времени  $t = 15$  с (максимальная концентрация  $C_{max} = 11,61$  мг/м<sup>3</sup>,  $U = 1$  м/с,  $\mu_x = \mu_y = 0,5$  м<sup>2</sup>/с)

Эти данные позволяют оценить вид формирующейся зоны загрязнения, ее размеры и интенсивность. Хорошо видно, как с течением времени формируется сложная зона загрязнения, обусловленная влиянием зданий, находящихся в этом районе.

Проведя численные расчеты, можно сделать анализ уровня загрязнения воздушной среды на улицах в любом интересующем месте. Например, на рисунках 8 – 9 показана динамика изменения концентрации CO вдоль улиц, которые на рисунке 1 условно показаны линиями АВ, CD.

Если учесть, что среднесуточное ПДК в атмосферном воздухе населенных мест по CO составляет 3 мг/м<sup>3</sup>, то из приведенных ниже графиков можно легко определить зоны на улицах, где происходит нарушение или значительное превышение санитарных норм.

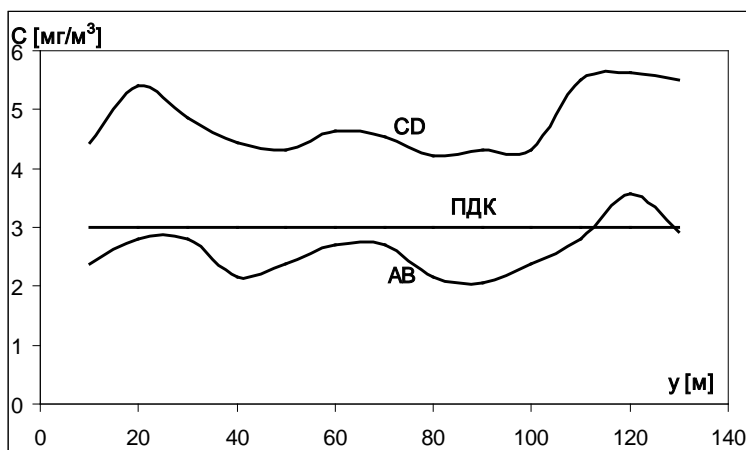


Рис. 8. Изменение концентрации CO вдоль выделенных участков улиц АВ и CD  
 ( $t = 150$  с,  $C_{max} = 10,84$  мг/м<sup>3</sup>,  $U = 4$  м/с,  $\mu_x = \mu_y = 2$  м<sup>2</sup>/с)

На рисунке 8 видно, что улица АВ имеет участки, где концентрация CO не превышает ПДК, т. е. находится в пределах значений, которые не оказывают значительного влияния на население близлежащих жилых домов, также есть участки с незначительным превышением ПДК. Улица АВ находится слева от дороги, а направление ветра вправо, т. е. большая часть загрязняющих веществ сносится потоком по направлению ветра, поэтому значение концентрации загрязняющих веществ на участке CD превышают ПДК на всей протяженности.

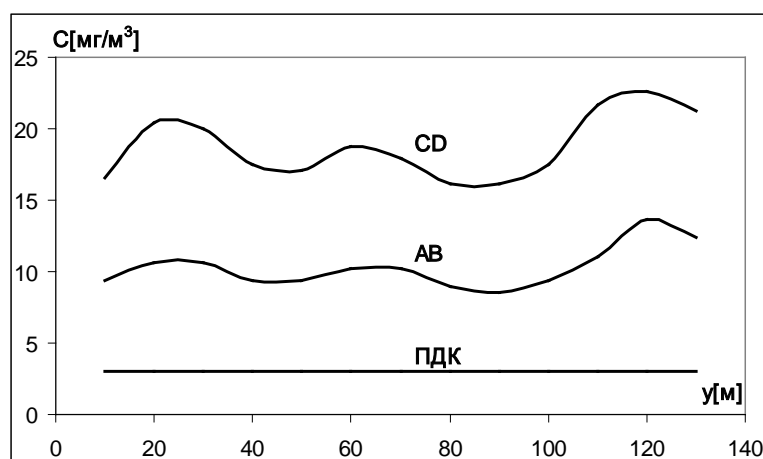


Рис. 9. Изменение концентрации CO вдоль выделенных участков улиц АВ и CD  
 ( $t = 150$  с,  $C_{max} = 42,58$  мг/м<sup>3</sup>,  $U = 1$  м/с,  $\mu_x = \mu_y = 0,5$  м<sup>2</sup>/с)

На рисунке 9 можно видеть, что при метеорологических условиях, близких к штилю, на всей протяженности улиц АВ и CD значение концентрации загрязняющих веществ в несколько раз выше предельно допустимых, т. е. происходит резкое ухудшение экологической обстановки в данном районе.

Результаты данной задачи иллюстрируют возможность применения построенной численной модели для решения актуальных задач урбоэкологии. На расчет задачи потребовалось 9 с компьютерного времени.

**Выводы.** Разработана эффективная CFD модель для прогноза уровня загрязнения атмосферы на улицах. Предложенная модель позволяет оценить динамику распространения загрязнителя на улицах, находящихся вдоль автомагистралей.

Отличительной чертой модели является оперативность ее реализации на ПК, что позволяет применять ее для проведения серийных расчетов. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее адаптации к 3-D расчету загрязняющих веществ. Модель



дает возможность выявить подзоны интенсивного загрязнения воздушной среды на улицах при неблагоприятных метеорологических условиях.

### 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. Бруцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. – К. : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
3. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев – К. : Наук. думка, 1997. – 368 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. – М. : Наука, 1982. – 316 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
6. Шаталов А. А. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа / А. А. Шаталов, М. В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46 – 52 с.
7. Belyaev M. 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. – С. : Environmental Security, Springer, 2007. – P. 327 – 336.
8. Biliaiev M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // 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.
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 / S. Murakami, A. Mochida, H. Yoshihiko // 8th Intern. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, July 8-11, 1991. – № 12 – 3.
11. 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 Modeling and it's Application, 27 September – 01 October, Torino, Italy, 2010. – № 4.9.

УДК 624.044:539.376

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОПЕРЕЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ

*С. О. Слободянюк, д .т. н, проф., А. Д. Щербачов, асист., О. А. Моргул, студ.*

**Ключові слова:** коефіцієнт поперечної деформації повзучості, експеримент, призми

**Постановка проблеми.** При дії навантаження поряд із поздовжніми бетоном має й поперечні деформації. Питання про поперечні деформації бетону досить суттєве для теорії повзучості в цілому. При розв'язанні плоских і просторових задач теорії повзучості потрібне залучення фізичних рівнянь, що встановлюють зв'язок між напруженнями й деформаціями бетону, у які, крім модулів пружності поздовжньої деформації  $E(\tau)$  і деформації зсуву  $G(\tau)$ , входять коефіцієнти пружної поперечної деформації  $\nu_1(\tau)$  і поперечної деформації повзучості  $\nu_2(t, \tau)$ . Тому виникає питання про співвідношення коефіцієнта поперечної деформації повзучості з коефіцієнтом пружних поперечних деформацій у часі.

**Аналіз публікацій.** Питання про коефіцієнт поперечної деформації повзучості бетону  $\nu_2(t, \tau)$  уже розглядалося в деяких працях [1 – 18 та ін.]. Досліджувалася величина коефіцієнта  $\nu_2(t, \tau)$ , його залежність від величини напруг  $\sigma$  у бетоні, від віку бетону  $\tau$  у момент його завантаження, а також поведінка зміни коефіцієнта в часі  $t$  під дією навантаження. Згідно з нечисленними експериментами, проведеними на цю тему, значення величини  $\nu_2(t, \tau)$  досить