

УДК 519.6:504.3.054

**Т. И. Русакова\*, Н. Н. Беляев\*\*, В. И. Карплюк\***

*\*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА УЛИЦАХ ПРИ ВЫБРОСАХ АВТОТРАНСПОРТА**

Разработана эффективная прогнозная модель для исследования динамики загрязнения атмосферного воздуха от автотранспортных выбросов в условиях «уличного каньона». Модель основывается на совместном решении гидродинамической задачи с использованием модели вихревых отрывных течений невязкой жидкости и задачи массопереноса о рассеивании газовых выбросов при движении автотранспорта. Данная прогнозная модель позволяет определить уровень загрязнения атмосферного воздуха с учетом важных факторов: скорости ветра, атмосферной диффузии, размеров зданий, интенсивности выброса. Представлены результаты численных расчетов и экспериментальных исследований. Преимуществом разработанной модели является возможность проведения расчетов по рассеиванию выбросов автотранспорта в условиях «уличного каньона» с учетом защитных экранов, расположенных вдоль автомагистрали.

**Ключевые слова:** загрязнитель, автотранспорт, интенсивность выброса, концентрация загрязняющего вещества, завихренность, функция тока, численная модель, уравнение переноса примеси, защитные экраны.

Розроблено ефективну прогнозну модель для дослідження динаміки забруднення атмосферного повітря від автотранспортних викидів в умовах «вуличного каньйону». Модель ґрунтується на одночасному розв'язанні гідродинамічної задачі з використанням моделі вихрових відривних течій невязкої рідини та задачі масопереносу про розсіювання газових викидів під час руху автотранспорту. Дана прогнозна модель дозволяє визначати рівень забруднення атмосферного повітря з урахуванням важливих факторів: швидкості вітру, атмосферної дифузії, розмірів будівель, інтенсивності викиду. Наведено результати чисельних розрахунків та експериментальних досліджень. Перевагою розробленої моделі є можливість проведення розрахунків з розсіювання викидів в умовах «вуличного каньйону» з урахуванням захисних екранів, розташованих уздовж автомагістралі.

**Ключові слова:** забруднювач, автотранспорт, інтенсивність викиду, концентрація забруднюючої речовини, завихреність, функція течії, чисельна модель, рівняння переносу домішки, захисні екрани.

Effective predictive model developed to study the dynamics of air pollution under emissions from automobile transport in the conditions of a "street canyon". The model is based on the combined solution hydrodynamic task with use of the model of vortex separated flows of an inviscid fluid and task of the distribution of gas emissions from automobile traffic. This predictive model can calculate the level of air pollution given the important factors: wind speed, atmospheric diffusion, building size, emission intensity. The numerical results and experimental researches are presented in the work. Using this model we can calculate the dispersion of emissions from automobile transport for «street canyon» using protective screens arranged along the highway.

**Key words:** pollutant, auto transport, concentration of the pollutant, vorticity, stream function, numerical model, equation for the transport of admixtures, protective screens.

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** Автомобильный транспорт – один из наиболее мощных источников загрязнения атмосферного воздуха в городах. Количество автомобилей, как правило, с каждым годом увеличивается, поэтому возрастает антропогенная нагрузка на окружающую среду. Это одна из причин, лежащая в основе прогнозирования качества воздушной среды в городах. С другой

стороны, изменение в структуре транспортных потоков города, создание новых автомагистралей, реконструкция микрорайонов требует предварительного определения уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта. Поэтому актуальной задачей является создание эффективных моделей, позволяющих прогнозировать качество воздушной среды на улицах с учетом основных физических факторов, влияющих на формирование зон загрязнения на улицах городов.

В Украине для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта используют эмпирические модели или аналитические модели типа Гаусса [1; 2; 7]. Оба класса таких моделей имеют существенный недостаток: они не могут учесть при прогнозе наличие зданий, защитных экранов, установленных вдоль автомагистрали. За рубежом кроме эмпирических моделей (модель Джонсона [2; 7], модель «STREET») используют CFD модели [9; 10; 11]. Эти CFD модели дают возможность учитывать влияние зданий на характер формирования зон загрязнения на улицах, но при этом требуют для практической реализации очень мощных компьютеров и продолжительного времени расчета для прогноза уровня загрязнения воздушной среды только для небольшого микрорайона города. Такие существенные затраты времени на реализацию CFD моделей связаны 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. В настоящее время, для проведения серийных расчетов такие модели практически не используют.

**Целью** данной работы является разработка CFD модели, не требующей больших затрат компьютерного времени и применения мощных ПК при проведении серийных расчетов, для прогнозирования уровня загрязнения атмосферного воздуха на улицах при выбросах от автотранспорта

**Математическая модель.** В данной работе рассмотрим рассеивание выбросов автотранспорта при расположении зданий по схеме «уличный каньон» (рис. 2.) Для решения гидродинамической задачи – определение поля скорости ветрового потока при обтекании зданий – используем модель отрывных вихревых течений невязкой жидкости [6]. В этом случае базовыми уравнениями являются уравнение переноса завихренности (1) и уравнение Пуассона для расчета функции тока (2) [6]:

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

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

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

Компоненты вектора скорости ветрового потока рассчитываем 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 используем подход, изложенный в работе [6].

Для данных уравнений гидродинамики осуществляем постановку следующих граничных условий. Для уравнения Пуассона на поверхности препятствий ставим граничное условие «непротекания» [6]:  $\psi=0$ .

На границе входа воздушного потока в расчетную область задаем 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 ставим условие «непротекания»:  $\psi=\text{const}$ .

На границе выхода воздушного потока из расчетной области ставим «мягкие» граничные условия, необходимые для замыкания разностных уравнений [6].

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

Процесс рассеивания в атмосфере выбросов от автотранспорта моделируем с помощью следующего уравнения [3; 6; 8]:

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

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, вымывание его осадками [2];  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения изложена в работах [3; 6].

Для формирования вида расчетной области, положения зданий, их формы, используем метод маркирования расчетной области [6]. Расчет выполняем 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 применим попеременно-треугольную разностную схему [4–6]. 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

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

где  $u^+ = \frac{u+|u|}{2}$ ;  $u^- = \frac{u-|u|}{2}$ ;  $v^+ = \frac{v+|v|}{2}$ ;  $v^- = \frac{v-|v|}{2}$ .

Значение завихренности на каждом расчетном шаге рассчитываем по формуле “бегущего” счета.

Значение функции тока рассчитываем с помощью разностной схемы суммарной аппроксимации [4–5]. В этом случае разностные уравнения можно записать так:

$$\begin{aligned}
 & \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{4}} - \psi_{i,j}^n = \frac{\bar{\omega}_{i,j}}{2} ; \\
 \text{- на первом шаге} & \\
 & \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i,j}^n = - \frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} - \frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \psi_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} ; \\
 \text{- на втором шаге} & \\
 & \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\psi_{i+1,j}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta x^2} + \frac{\psi_{i,j+1}^{n+\frac{3}{4}} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta y^2} ; \\
 \text{- на третьем шаге} & \\
 & \psi_{i,j}^{n+1} - \psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}} = \frac{\bar{\omega}_{i,j}}{2} , \\
 \text{- на четвертом шаге} &
 \end{aligned}$$

$$\bar{\omega}_{i,j} = \frac{1}{4} (\omega_{i,j} + \omega_{i-1,j+1} + \omega_{i-1,j-1} + \omega_{i,j-1}) .$$

Численное интегрирование уравнения переноса примеси проводим с помощью неявной разностной схемы расщепления [6].

Производную по времени аппроксимируем 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

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

С учетом предыдущего выражения конвективные производные аппроксимируем разделенными разностями “против потока” на верхнем временном слое:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial u^+ C}{\partial x} & \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1} , & \frac{\partial u^- C}{\partial x} & \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1} , \\
 \frac{\partial v^+ C}{\partial y} & \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1} , & \frac{\partial v^- C}{\partial y} & \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1} .
 \end{aligned}$$

Компоненты скорости  $u$  определяем 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 аппроксимируем следующим образом:

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

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) запишем

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

Обозначим  $\delta_{ij}$  – 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 примут 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 используем 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 CFD модель переноса загрязняющих веществ на улицах. Данная модель позволяет учитывать следующие факторы:

- наличие зданий и их взаимное расположение на улице;
- скорость ветра;
- атмосферная диффузия;
- местоположение и интенсивность выброса загрязняющего вещества;
- возможность использования защитных экранов на улице.

Необходимо отметить, что построенную численную модель можно использовать для решения как традиционных задач в области урбоэкологии – выброс автотранспорта, так и для задач аварийного загрязнения атмосферы на улицах.

**Практическая реализация модели.** Разработанная прогнозная модель была использована для моделирования загрязнения воздушной среды на проспекте Героев города Днепропетровска при отсутствии и наличии защитных экранов вдоль автомагистрали.



**Рис. 1.** Участок автомагистрали на проспекте Героев: АВ – участок измерений

Предварительно были проведены натурные измерения концентрации СО на автомагистрали проспекта Героев. Выбор данной магистрали обусловлен следующими причинами:

- с обеих сторон автомагистрали расположены однотипные жилые дома, поэтому данный участок полностью соответствует схеме «уличный каньон»;
- посередине проезжей части находится полоса отчуждения для пешеходов, где можно непосредственно произвести измерения;
- на рассмотренном участке автомагистрали находится светофор и в момент остановки транспортного потока удобно произвести измерения (нет возмущенного движения потока воздуха, вызванного движением автомобилей).

Для измерения концентрации СО использовали газоанализатор GD-3301, позволяющий измерять концентрацию от 0 до 1000 ppm, а измерения скорости

ветра – анемометр GM 8908 с диапазоном измерения скорости потока воздуха 0-30 м/с.

На рис. 1 представлена вырезка из карты участка автомагистрали на проспекте Героев, где проводился эксперимент (АВ – исследуемый участок). На рис. 2 изображена схема того участка, где проводились измерения.

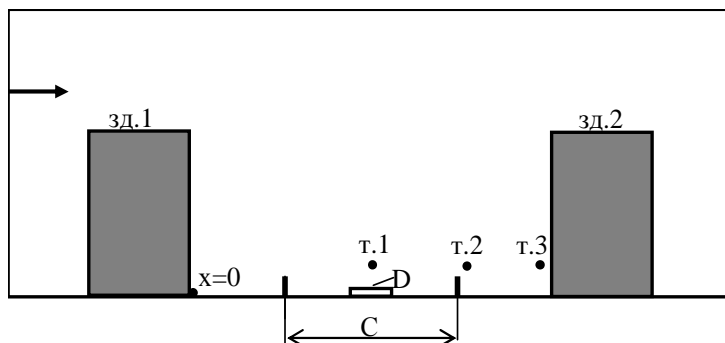


Рис. 2. Схема участка, где проводились измерения: С – проезжая часть; D – зона отчуждения для пешехода; т.1, т.2, т.3 – точки измерения

Концентрации CO измеряли в следующих точках:

- точка 1 – середина зоны отчуждения, 33 м от начала координат ( $x=0$ );
- точка 2 – на расстоянии 3 м от бровки, 45 м от начала координат ( $x=0$ );
- точка 3 – на расстоянии 3 м от второго здания, 63 м от начала координат ( $x=0$ ).

Измерения проводили с шагом 3 мин при красном сигнале светофора, когда на левой части автотрассы стоит транспорт с работающими двигателями на холостом ходу, а на правой части транспорта нет. Измерения выполняли в течение времени с  $7^{45}$  по  $8^{45}$ , в период с 16.12.2013 по 18.12.2013 года на высоте  $h=1$  м. Усредненные значения экспериментальных данных значений концентрации CO представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение расчетных и экспериментальных данных концентрации CO

Дата измерений, скорость воздушного потока	Концентрация CO, мг/м <sup>3</sup>					
	1-я точка		2-я точка		3-я точка	
	Расчет	Экспер.	Расчет	Экспер.	Расчет	Экспер.
16.12.2013 г., V=2,5 м/с	61,2	61,2	38,4	31,8	3,7	2,7
17.12.2013 г., V=3,2 м/с	58,4	58,4	36,5	30,3	3,5	2,6
18.12.2013 г., V=2,3 м/с	64,6	64,6	40,3	33,5	3,8	2,9

Дополнительно проводили измерение скорости воздушного потока на расстоянии 20 м за первым зданием на высоте  $h=1$  м, значения которой составили: 2,5 м/с, 3,2 м/с, 2,3 м/с. Фоновая концентрация там же составляла  $0,2 \cdot \text{ПДК} = 0,6$  мг/м<sup>3</sup>. По измеренным значениям скорости выполняли перерасчет этой величины для высоты на уровне крыши по зависимости  $u = u_1(Y/Y_1)^n$ ,

где  $u_1$  – значение скорости ветра на высоте  $Y_1=h=1\text{м}$ ;  $n=0,15$ . Значения скорости на уровне крыши равны: 4,1 м/с; 5,4 м/с; 3,8 м/с.

Полученные данные были использованы для тестирования прогнозной модели. В табл. 1 приведены расчетные значения концентрации CO, полученные на базе разработанной прогнозной модели отрывных течений невязкой жидкости.

На рис. 3 показана зона загрязнения для скорости ветра 4,1 м/с, соответствующая измерениям, проведенным 16.12.13 года. Анализируя полученные данные, представленные в табл. 1, можно констатировать, что расхождение между измеренными и расчетными значениями концентрации CO составляет 18 – 26 %.

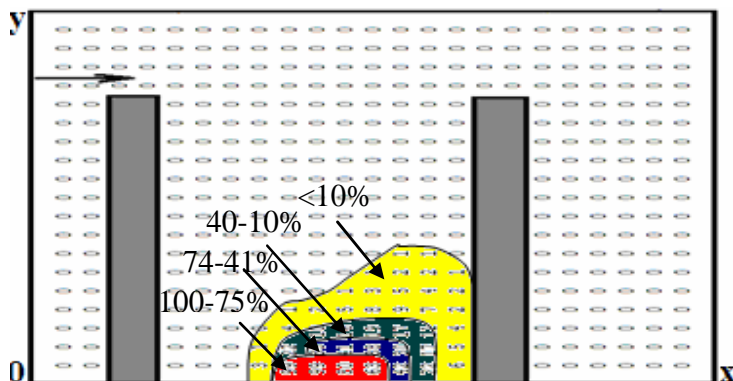


Рис. 3. Распределение концентрации CO без экрана

Снижение точности расчета в третьей точке, расположенной возле стенки второго здания, обусловлено влиянием растительности (кустов), во второй точке – влиянием стенки второго здания.

Из результатов (рис. 3) видно, что наиболее загрязненная зона формируется над автомагистралью до высоты  $h=5\text{м}$ , где концентрация изменяется от max на дороге (например,  $61,2\text{ мг/м}^3$ ) до  $9,78\text{ мг/м}^3$  (16 % от max). На наветренной стороне второго здания концентрация изменяется от  $3,67\text{ мг/м}^3$  (уровень  $h=1\text{ м}$ ) до значения  $0,67\text{ мг/м}^3$  (уровень  $h=11\text{ м}$ ).



Рис. 4. Защитный экран возле магистрали (Нидерланды)

Далее методом вычислительного эксперимента было исследовано влияние защитных экранов на снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха возле автомагистралей. Как известно, такие экраны достаточно широко применяют



зарубежом вдоль магистралей (рис. 4), поскольку они выполняют двойную функцию – шумозащитную и ограничительную при распространении вредных веществ. Эти экраны изготавливают из прозрачного материала, устанавливают, преимущественно, вдоль авто- и железнодорожных магистралей.

При решении данной задачи был произведен расчет зоны загрязнения вблизи автомагистрали для экранов высотой  $h=2$  м и  $h=4$  м. Численный расчет выполняли для скорости ветра на уровне крыши 4,1 м/с, т.е. по сценарию, соответствующему данным измерений 16.02.2013 года.

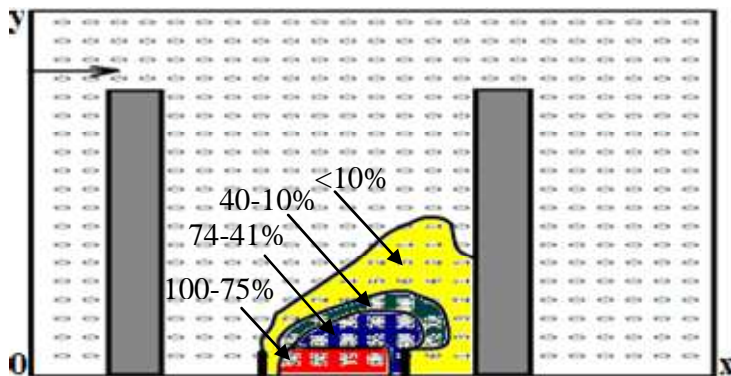


Рис. 5. Распределение концентрации CO с экраном высотой  $h=2$  м

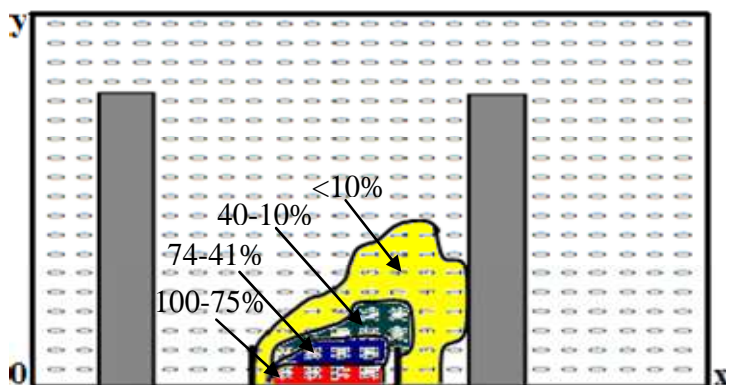


Рис. 6. Распределение концентрации CO с экраном высотой  $h=4$  м

Анализ результатов (табл. 2) показывает, что экраны выполняют существенную защитную функцию. Так, сравнивая результаты рис. 3 (нет экрана вдоль обочины дороги) с рис. 5 – 6, видим, что при отсутствии экрана концентрация возле дома на расстоянии 3 м от стены (уровень  $h=1$  м) составляет примерно 6 % от максимальной концентрации на автомагистрали, а с экраном высотой  $h=2$  м концентрация CO в данном месте на той же высоте составляет приблизительно 1 %, а с экраном  $h=4$  м – менее 1 %.

При отсутствии экрана зона загрязнения возле стены второго здания распространяется на высоту  $h \approx 11$  м, но значение концентрации до уровня 5 м изменяется от 6 % до 2 %. При наличии экрана высотой 2 м концентрация составляет около 3 %, а для экрана высотой 4 м – приблизительно 1 %. Также видно, что наиболее интенсивная зона загрязнения формируется между экранами.

Таблиця 2

Показатели значений концентрации СО при наличии защитного экрана и его отсутствии,  $V=2,5$  м/с

Наличие и высота экрана	Концентрация СО, мг/м <sup>3</sup>		
	1-я точка	2-я точка	3-я точка
без экрана	61,2	38,3	3,8
экран h=2м	61,2	3,7	0,7
экран h=4м	61,2	0,6	<<0,7

Таким образом, на основе проведенного вычислительного эксперимента можно предложить следующие рекомендации по снижению негативного влияния выбросов автотранспорта на людей, находящихся в жилых зонах вблизи автомагистрали. Эффективным есть установление вдоль автомагистралей экранов определенной высоты, рассчитанной с помощью разработанной прогнозной модели и с учетом наиболее типичных для конкретного региона скоростей ветра, размеров зданий и уровня загрязнения атмосферного воздуха на автомагистрали (интенсивности эмиссии). В районе проспекта Героев, 12 рекомендованная высота экрана должна быть не менее 2 м, что уменьшает концентрацию загрязнения прилегающих участков на 27 – 30 %. Однако при строительстве экрана необходимо предусмотреть просветы на определенных расстояниях для обеспечения вентиляции атмосферного воздуха на автомагистрали.

Для проверки адекватности прогнозной модели был проведен физический эксперимент по измерению скорости потока воздуха перед моделями зданий. Эксперимент проводился в аэродинамической трубе Т5, которая находится в лаборатории аэродинамики Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 7. Рабочая часть аэродинамической трубы Т5 выполнена открытой. Длина рабочей части равна 1115 мм, диаметр выходного сечения сопла  $D=750$  мм. Скорость потока измерялась с помощью трубки Пито  $d=8$  мм.



Рис. 7. Экспериментальная установка: 1 – модели зданий; 2 – ограничительные шайбы; 3 – аэродинамическая труба; 4 – микроманометры; 5 – координатник; 6 – трубка Пито

В рабочей части аэродинамической трубы устанавливались модели двух зданий, которые были изготовлены из нержавеющей стали (рис. 7, а, б) размерами

100мм\*100мм\*200мм. Размещение зданий представляло схему «уличный каньон», и поскольку эти здания занимали по ширине всю рабочую часть аэродинамической трубы, то их обтекание обуславливало моделирование двухмерной задачи.

Целью проведения эксперимента являлось измерение скорости воздушного потока и последующее сравнение этих данных с результатами расчета по разработанной прогнозной модели, описывающей гидродинамику воздушного потока при обтекании зданий на улице.

Измерения величины скорости воздушного потока проводили перед первым зданием на расстоянии 100 мм от него навстречу потоку при разных значениях зазора между зданиями:  $\Delta l = 2h, 4h$ .

На графике (рис. 8) представлены результаты численного эксперимента (сплошная линия) и физического эксперимента (точки). Эти данные получены для скорости воздушного потока в аэродинамической трубе  $V=12$  м/с и числа Рейнольдса  $Re=0,81 \cdot 10^5$ . Зазор между зданиями составлял:  $\Delta l=2h$  (первый вариант),  $\Delta l=4h$  (второй вариант),  $h$  – высота первого здания.

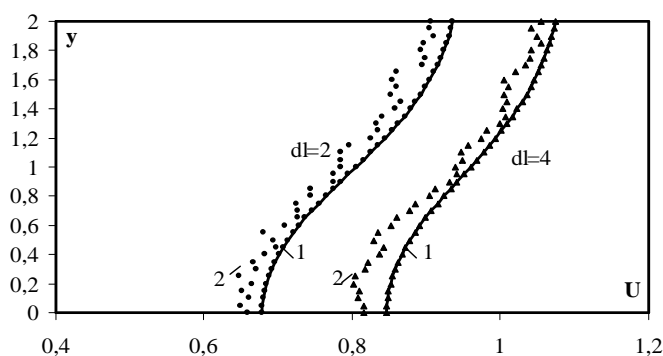


Рис. 8. Значение скорости перед зданиями в зависимости от величины зазора между зданиями  $\Delta l=2h, \Delta l=4h$ : 1 – численно; 2 – эксперимент

Как видно из представленного рисунка, имеет место удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных (расхождение приблизительно 10 %). К сожалению, ввиду отсутствия оборудования для точечного измерения концентрации примеси провести эксперимент по моделированию рассеивания примеси в условиях застройки в аэродинамической трубе не представлялось возможным.

**Выводы.** Представлена эффективная CFD модель для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха на улицах выбросами автотранспорта. Предложенная модель позволяет оценить динамику распространения загрязнителя на улицах для схемы «уличный каньон». Особенностью модели является то, что она позволяет при таком расчете учитывать наличие защитных экранов, расположенных вдоль автомагистрали. Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее адаптации к 3-D расчету рассеивания выбросов от автотранспорта на улицах.

### Библиографические ссылки

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.

2. **Бруязкий Е. В.** Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязкий. – К. : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
3. **Марчук Г. И.** Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М. : Наука, 1982. – 320 с.
4. **Самарский А. А.** Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
5. **Самарский А. А.** Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит, 2001. – 320 с.
6. 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.
7. **Hanna S.** Air Quality Modelling over Short Distances / S. Hanna // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling: 16 May-3 June. – 1994. – № SMR/760-2. – P. 712-743.
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 its Application, 27 September – 01 October, Torino, Italy, 2010. № P 1.7.
9. **Murakami S.** Overview of turbulence models applied in CWE / S. Murakami // Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1998. – № 74-76. – P.1-24.
10. **Ibrahim A. M.** Modeling of Air Pollution Dispersion in Street Canyons in Cross-Wind / Ibrahim A. M. Gad, Mofreh. M. Nasief, Salem S. Abdel Aaziz // 13th Intern. Conf. on Aerospace Sciences & Aviation Technology, ASAT-13, May 26-28, 2009.– P. 1-13.
11. **Chang Cheng-Hsin.** Numerical Simulation an Wind Tunnel Studies of Pollutant Dispersion in the Urban Street Canyons With Different Height Arrangements / Chang Cheng-Hsin, Lin Jin-Shian, Chii-Ming Cheng // J. of Marine Science and Technology. – 2013. – Vol. 21, No. 2. – P. 119-126.

*Надійшла до редколегії 01.05.2014*

УДК 539.3

**Ю.А. Черняков, А.Е. Шевелёва**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **ПОЛОСА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ИНТЕРФЕЙСЕ МЕЖДУ ДВУМЯ МАТЕРИАЛАМИ**

Исследована полоса локализации пластической деформации в области раздела двух материалов при условии, что диаграмма деформирования межматериальной прослойки имеет пик-«зуб». Сформулирована краевая задача Дирихле для кусочно-аналитической функции и записано ее точное аналитическое решение. Найдены длины полос локализации пластической деформации, приведена графическая иллюстрация скачка перемещений в полосе локализации и касательного напряжения на ее продолжении для различных внешних нагрузок и различных механических свойств материалов.

**Ключевые слова:** полоса локализации пластической деформации, кусочно-аналитическая функция, скачки перемещений.

Досліджено полосу локалізації пластичної деформації в області поділу двох матеріалів за умови, що діаграма деформування міжматеріального прошарку має пік-«зуб». Сформульовано крайову задачу Діріхле для кусково-аналітичної функції. Виписано її точний аналітичний

---

© Черняков Ю.А., Шевелёва А.Е., 2014