

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК 502.3:504.5:621.43.068.4

Т. И. РУСАКОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Аэрогидромеханика и энергомассоперенос», Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, ул. Казакова, 18, корп. № 14, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, эл. почта rusackovat@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5526-3578

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЫБРОСАМИ АВТОТРАНСПОРТА В «УЛИЧНЫХ КАНЬОНАХ» ГОРОДА

**Цель.** Статья посвящена анализу состояния атмосферного воздуха при его загрязнении выбросами автотранспорта в г. Днепропетровск, разработке численной модели и прикладной вычислительной программы для исследования уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах города при наличии нескольких зданий, расположенных по схеме «уличный каньон». **Методика.** Для достижения поставленной цели изучена динамика изменения концентрации различных вредных веществ, значения которой получены со стационарного поста наблюдения за качеством воздушной среды в г. Днепропетровск. Выполнена оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха отработанными газами автотранспорта (по данным Главного управления статистики в Днепропетровской области). Разработана методика численного расчета концентрации загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта. Для решения гидродинамической задачи по определению поля скорости ветрового потока на улицах города использовалась модель отрывных течений невязкой жидкости; для решения задачи по расчету процесса рассеивания загрязнения – уравнение конвективно-диффузионного переноса примеси. Для реализации предложенной методики использовались неявные разностные схемы. **Результаты.** В работе разработана математическая численная модель, а на ее основе создан пакет прикладных программ, позволяющий оперативно проводить вычислительные эксперименты по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах города при наличии нескольких зданий, расположенных по схеме «уличный каньон». В результате проведенных исследований были установлены закономерности по изменению концентрации оксида углерода возле рассматриваемой группы зданий при различной интенсивности выброса загрязнителя. **Научная новизна.** Разработана численная модель, позволяющая учесть гидродинамическое влияние группы зданий на рассеивание загрязняющих веществ при изменении величины скорости ветра и вертикального коэффициента диффузии с высотой. **Практическая значимость.** Проведение данного класса вычислительных экспериментов необходимо в случае реконструкции микрорайонов города, при проектировании и строительстве новых автомагистралей, изменении в структуре транспортных потоков внутри города.

**Ключевые слова:** загрязняющие вещества; автотранспорт; метод отрывных течений; невязкая жидкость; рассеивание выбросов; разностная схема; «уличный каньон»

#### Введение

Выбросы от автотранспорта в городах являются основным источником загрязняющих веществ в атмосфере, они постоянно растут как в Украине, так и во всем мире. К тому же вы-

бросы от автотранспорта являются наиболее трудно регулируемые. Следует отметить, что общая тенденция в мире – снижение доли перевозок грузов железнодорожным транспортом, который, как известно, осуществляет значи-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

тельно меньше выбросов в атмосферу по сравнению с автомобильным. Это связано с тем, что автомобильный транспорт, в отличие от железнодорожного, позволяет доставить груз непосредственно на объект. Совершенно очевидно, что такая тенденция имеет место и в Украине. Это значит, что интенсивность автодорожного транспорта будет увеличиваться.

Наибольший вклад в экологический ущерб (62,7 %) вносит автотранспортный комплекс, вклад железнодорожного транспорта достигает 27,7 %, воздушного – 4,5 %, морского – 3,6 % и речного – 1,5 %. Во всех видах негативного воздействия «лидирует» автомобильный транспорт (шум – 49,5 %, воздействие на климат – 68 %, загрязнение атмосферного воздуха – 71 %), за ним следует железнодорожный транспорт. Каждый автомобиль выбрасывает в атмосферу с отработавшими газами около 200 различных компонентов. В выхлопных газах содержатся углеводороды – несгоревшие или не полностью сгоревшие компоненты топлива, доля которых резко возрастает, если двигатель работает на малых оборотах или в момент увеличения скорости на старте, т. е. во время затормозов и у красного сигнала светофора. Именно в этот момент, когда нажимают на акселератор, выделяется больше всего несгоревших частиц: примерно в 10 раз больше, чем при работе двигателя в нормальном режиме. В выхлопных газах двигателя, работающего на нормальном бензине и при нормальном режиме, содержится в среднем 2,7 % оксида углерода. При снижении скорости эта доля увеличивается до 3,9 %, а на малом ходу – до 6,9 %. Оксид углерода, углекислый газ и большинство других газовых выбросов двигателей тяжелее воздуха, поэтому все они скапливаются у земли и представляют значительную угрозу для населения в местах нахождения автомагистралей. Вот поэтому, возможность оперативной оценки уровня концентрации загрязняющих веществ, которые поступают в атмосферу вместе с работой автотранспорта, является актуальной задачей экологической безопасности города.

В настоящее время используется несколько классов математических моделей для решения данного класса задач: эмпирические модели [3] и аналитические модели [13], которые не позволяют учесть гидродинамические процессы при обтекании воздушным потоком зданий раз-

личной формы и размеров, а также численные модели на базе уравнений Навье-Стокса [14, 16–18], которые, учитывая эти процессы, занимают для единичных расчетов большое количество времени.

Сегодня, когда увеличивается количество автотранспорта в каждом городе, необходима разработка новых математических моделей для проведения оперативных численных расчетов по определению концентрации загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта вдоль жилых улиц города «уличных каньонов», где находятся автомагистрали с интенсивным движением автотранспорта.

### Цель

Целью данной работы является анализ состояния атмосферного воздуха города Днепропетровска, разработка численной модели и прикладной вычислительной программы для исследования загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах города при наличии нескольких зданий, расположенных по схеме «уличный каньон».

### Методика

Проведен анализ статистических данных по величине выбросов загрязняющих веществ в городе Днепропетровске, что позволило оценить состояние атмосферного воздуха при его загрязнении выбросами автотранспорта.

На территории Днепропетровска находится около 1 500 автохозяйств, государственного транспорта насчитывается около 27 тысяч единиц, в личном пользовании граждан находится около 123 000 автомобилей.

Центральная геофизическая обсерватория Украины, которая отслеживает состояние воздуха в 53 городах страны, опубликовала рейтинг самых экологически-загрязненных городов [11]. Согласно ему Днепропетровск занимает 14 место в этой таблице.

В Днепропетровске размещен комплекс стационарных постов наблюдения за качеством воздушной среды (табл. 1). Данные посты осуществляют постоянный мониторинг уровня загрязнения воздушной среды различными вредными веществами.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Таблица 1

## Автоматические посты контроля атмосферного воздуха г. Днепропетровска

Table 1

## Automatic inspection stations of air in Dnepropetrovsk city

Пост №1	пр. Калинина, 77
Пост №10	парк им. Шевченко
Пост №11	пл. Островского
Пост №13	ул. Философская, 94
Пост №19	ул. Краснопольская, 11
Пост №20	ул. Петровского, 38
Пост №23	ул. Каруны, 125
Пост №24	ул. Б. Хмельницкого, 20
Пост №25	пр. Героев, 21
Пост №26	ж/м Левобережный

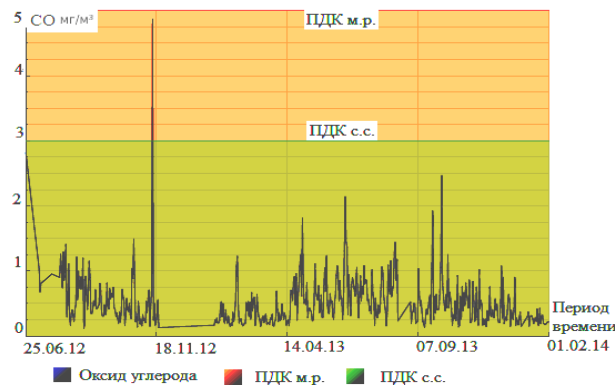


Рис. 1. Изменение концентрации оксида углерода

Fig. 1. Concentration changes of carbon monoxide

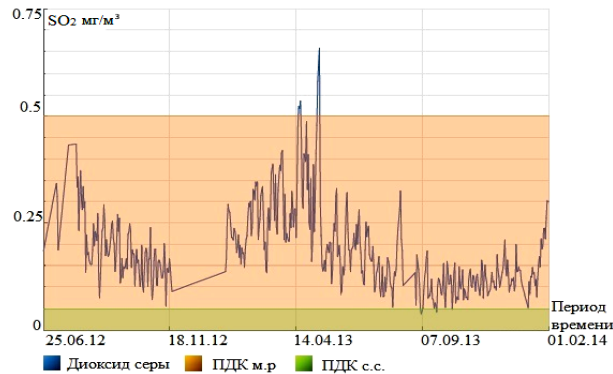


Рис. 2. Изменение концентрации диоксида серы

Fig. 2. Concentration changes of sulfur dioxide

Так, на рис. 1–2 представлены данные с поста № 1 по величине концентрации оксида углерода и диоксида серы за период времени с 25.06.2012 по 01.02.2014.

Анализируя данные рис. 1–2, следует отметить, что показания данного поста не позволяют оценить влияние автотранспорта на уровень загрязнения атмосферы, поскольку пост размещен на определенном расстоянии от автомагистрали.

Анализ статистических данных по качеству воздушной среды в городе Днепропетровске показал, что в ряде районов (пл. Островского, пр. Газеты «Правда», пл. Ленина) наблюдается превышение предельно допустимых норм уровня загазованности по оксиду углерода (CO) и углеводороду (СН). Наибольший уровень загрязнения воздуха отмечен на пл. Островского – одной из транспортных развязок Днепропетровска. Одной из причин загрязнения воздуха являются отработанные газы автотранспорта.

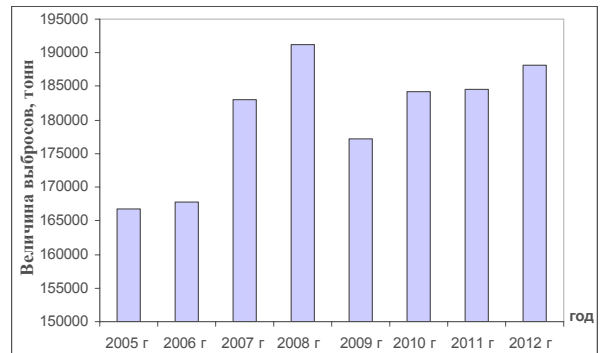


Рис. 3. Величина выбросов загрязняющих веществ (кроме оксида углерода)

Fig. 3. Emissions value (except carbon monoxide)

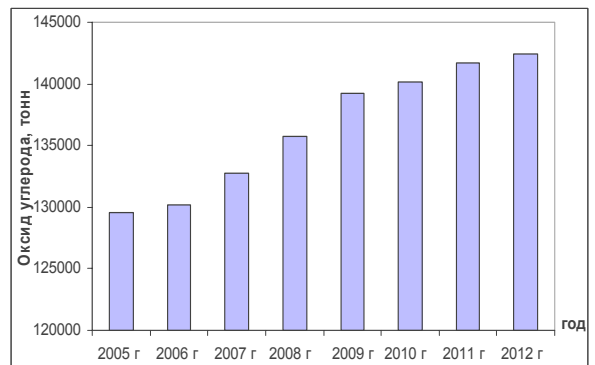


Рис. 4. Величина выбросов оксида углерода

Fig. 4. Value of carbon dioxide emissions

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

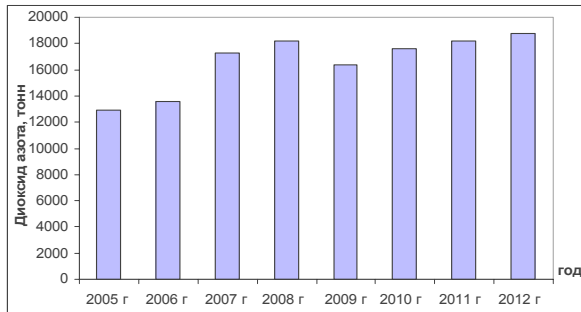


Рис. 5. Величина выбросов диоксида азота

Fig. 5. Value of nitrogen dioxide emissions

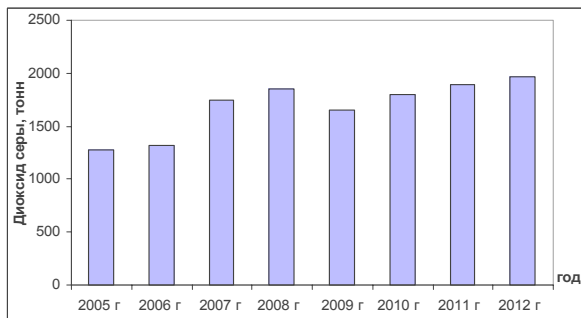


Рис. 6. Величина выбросов диоксида серы

Fig. 6. Value of sulfur dioxide emissions

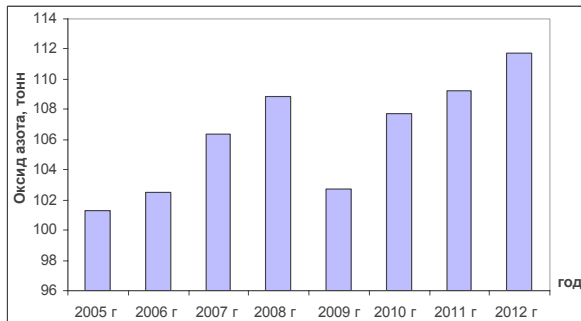


Рис. 7. Величина выбросов оксида азота

Fig. 7. Value of nitrogen oxide emissions

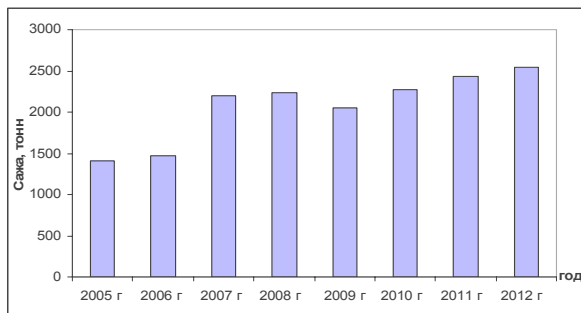


Рис. 8. Величина выбросов сажи

Fig. 8. Value of soot emissions

В работе был выполнен анализ интенсивности эмиссии загрязняющих веществ от автотранспорта в Днепропетровской области. Для анализа использовались данные Главного управления статистики в Днепропетровской области [11].

Предоставленные данные были обработаны и представлены в виде графиков (рис. 3–8), которые дают возможность проанализировать динамику выбросов *от всех видов автотранспорта* в атмосферу по Днепропетровской области за период с 2005 года по 2012 год как по общим выбросам, так и по отдельным их составляющим: оксиду углерода, диоксиду азота, оксиду азота, диоксиду серы, сажи. Как видно, эти показатели постоянно увеличиваются.

Как видно из представленных графиков (рис. 3–8), в Днепропетровской области наблюдается большая эмиссия загрязняющих веществ от автотранспорта. Максимум выбросов был зафиксирован в 2008 году, а затем снижается примерно на 12 %, что, очевидно, обусловлено экономическим кризисом, который начался осенью 2008 года. В настоящее время происходит увеличение всех выбросов загрязнителей от автотранспорта, среди которых оксид углерода занимает лидирующее место.

В работе рассматривается процесс распространения загрязняющих веществ на улице при наличии нескольких зданий, расположенных по схеме «уличный каньон» (рис. 9) [8–9, 14, 16, 18].

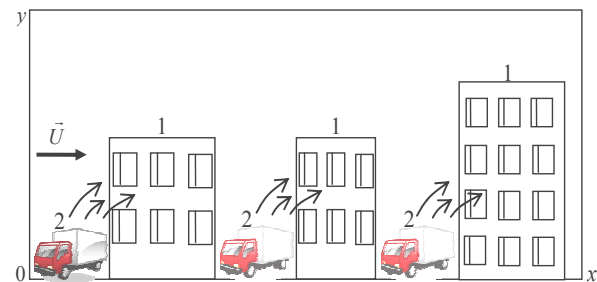


Рис. 9. Схема расчетной области:

1 – здания; 2 – места эмиссии загрязнителей

Fig. 9. The computational domain:

1 – buildings; 2 – emission places of pollutants

Для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта необходимо предварительно решить гидродинамическую задачу по определению поля скорости ветрового потока на улице. Для решения этой задачи применяется модель отрывных вихре-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вых течений невязкой жидкости [6, 12], поскольку решение этой задачи методом дискретных вихрей, который был рассмотрен в работах [1, 8–9], представляет определенную трудность в алгоритме расчета поля скорости.

В этом случае базовыми уравнениями являются: уравнение переноса завихренности (1) и уравнение Пуассона для расчета функции тока (2):

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

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

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

Компоненты вектора скорости ветрового потока:  $u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ ,  $v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ .

Так как отрыв потока происходит в угловых точках зданий, то возникает задача расчета их интенсивности, для решения которой используется подход, рассмотренный в работах [6, 12, 15].

Для уравнения Пуассона на поверхности препятствий ставится граничное условие «непротекания»:  $\psi = 0$ .

На границе входа воздушного потока в расчетную область задается вектор скорости воздушного потока 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.

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  $\omega|_{t=0} = \omega_0(x, y)$ .

После решения уравнений (1)–(2) и расчета поля скорости ветрового потока решается задача о переносе загрязняющих веществ на улицах. Для моделирования этого процесса используется уравнение переноса примеси в атмосфере [6, 12, 15]:

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

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 [5–6, 12].

Для формирования вида расчетной области, положения зданий, их формы, используется метод маркирования расчетной области [12]. Расчет выполняется на прямоугольной разностной сетке. Используя данный метод, можно формировать любую форму зданий на улицах и выбирать их взаимное расположение.

*Метод решения.* Для численного интегрирования уравнений гидродинамики используются неявные разностные схемы. Так для интегрирования уравнения переноса завихренности применяется попеременно-треугольная разностная схема [2, 7, 10]. 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  $u^+ = \frac{u+|u|}{2}$ ,  $u^- = \frac{u-|u|}{2}$ ,  $v^+ = \frac{v+|v|}{2}$ ,  $v^- = \frac{v-|v|}{2}$ .

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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:

– на первом шаге

$$\frac{\Psi_{i,j}^{n+\frac{1}{4}} - \Psi_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{\bar{\omega}_{i,j}}{2},$$

– 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

$$\frac{\Psi_{i,j}^{n+1} - \Psi_{i,j}^{n+\frac{3}{4}}}{\Delta t} = \frac{\bar{\omega}_{i,j}}{2},$$

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

Численное интегрирование уравнения переноса примеси проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [6, 12].

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 одностороннего 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:

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

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

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

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

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:

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

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

$$\frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$- \mu_y \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

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 (14) записывается

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

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:  $q_{ij} = q_k / (\Delta x \Delta y)$ .

Расщепляем разностное уравнение на четыре разностных уравнения так, чтобы на каждом

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

шаге учитывалось лишь одно направление переноса возмущений, определяемое знаком при конвективной производной. В этом случае разностные уравнения имеют вид:

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

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

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

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

– на третьем шаге расщепления  $k = n + \frac{3}{4}$ ,

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

– на четвертом шаге расщепления  $k = n + 1$ ,

$$\begin{aligned} c = n + \frac{3}{4} \\ \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \\ + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

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

тождественно равно нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса.

Поскольку на каждом шаге расщепления шаблон разностных уравнений имеет треугольную форму, то на верхнем временном слое неизвестное значение функции  $C$  находится по методу «бегущего счета».

## Результаты

Разработанная численная модель была применена для расчета концентрации оксида углерода для схемы «уличный каньон» при наличии трех зданий (рис. 10–11). Рассматривалось два сценария.

Первый сценарий: на каждой улице происходит выброс CO от автотранспорта с интенсивностью  $Q = 0,5$  г/с.

Второй сценарий: интенсивность выброса CO возле первого здания возрастает и становится равной  $Q = 1,2$  г/с, а на остальных улицах остается неизменной  $Q = 0,5$  г/с. То есть второй сценарий моделирует ситуацию, когда на первой улице увеличивается интенсивность движения автотранспорта.

Расчет выполнялся при следующих данных: высота первого здания 16 м, длина 20 м; высота второго здания 16 м, длина 15 м; высота третьего здания 24 м, длина 20 м. Размеры расчетной области: 125 м × 84 м.

Для учета изменения величины скорости ветра с высотой  $Y$  на практике наиболее часто используют модели вида [5]:  $u = u_1 \frac{\lg Y/Y_0}{\lg Y_1/Y_0}$ ,

$u = u_1 (Y/Y_1)^n$ , где  $u_1$  – значение скорости ветра на некоторой фиксированной высоте  $Y_1$ ;  $n \approx 0,15 \div 0,69$  (зависит от величины шероховатости подстилающей поверхности  $Y_0$  м и класса устойчивости атмосферы [5]).

Как известно, величина шероховатости подстилающей поверхности  $Y_0$  примерно состав-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ляет 10 % от высоты элементов «выступов» (травы, посевов), а для сложного рельефа местности (деревья, здания) она варьируется в диапазоне  $Y_0 = 1 \text{ м} \div 10 \text{ м}$  [2, 7].

*Расчет коэффициентов турбулентной диффузии.* На практике для расчета величины вертикального коэффициента диффузии, который, как известно, определяет степень устойчивости атмосферы, используются различные модели. Например, [3, 5]:

– для высоты  $Y > hh$  ( $hh$  – высота приземного слоя) можно считать:  $\mu_y = \gamma + k_1 \frac{hh}{Y_1}$ , где  $\gamma$  –

коэффициент молекулярной диффузии (в прикладных расчетах можно полагать  $\gamma = 0$ );  $k_1$  – коэффициент турбулентной диффузии на высоте  $Y_1$ , зависящий от конкретного региона (в США используют значение  $hh = 100 \text{ м}$ ;  $k_1 = 0,2 \text{ м}^2/\text{с}$  для  $Y_1 = 2 \text{ м}$ ) [5];

– для высоты  $Y < hh$ ,  $\mu_x \approx \mu_y$ , горизонтальный коэффициент турбулентной диффузии рассчитывается по формуле [3, 5]:  $\mu_x = (0,1 \div 1)u$ ; вертикальный коэффициент диффузии определяется так:  $\mu_y = \gamma + k_1 \frac{Y}{Y_1}$ , где  $k_1 = 0,1 \div 0,2 \text{ м}^2/\text{с}$ ,

высота приземного слоя атмосферы обычно принимается равной  $hh = 50 \div 100 \text{ м}$ .

В разработанной численной модели скорость ветра определяется по зависимости  $u = u_1 (Y/Y_1)^n$ , где  $u_1 = 4,5 \text{ м/с}$  – значение скорости ветра на высоте  $Y_1 = 10 \text{ м}$ ;  $n = 0,15$ . Значение вертикального коэффициента диффузии определяется по зависимости

$\mu_y = k_1 \left( \frac{Y}{Y_1} \right)^m$ ,  $k_1 = 0,2$ ,  $m \approx 1$  [3, 5].

В результате проведенных исследований были установлены закономерности по изменению концентрации оксида углерода возле рассматриваемой группы зданий при различной интенсивности выброса оксида углерода. На рис. 10–11 показаны зоны загрязнения атмосферного воздуха для каждого сценария. Каждое число – величина концентрации в процентах от максимального значения концентрации на расчетный момент времени. Хорошо видно, что под влиянием выбросов находятся все здания на улице. Наибольшее загрязнение наблюдается в каньонах между первым и вторым зданиями, а также

между вторым и третьим зданиями – места эмиссии загрязнителя. Это связано с тем, что здесь формируются застойные области.

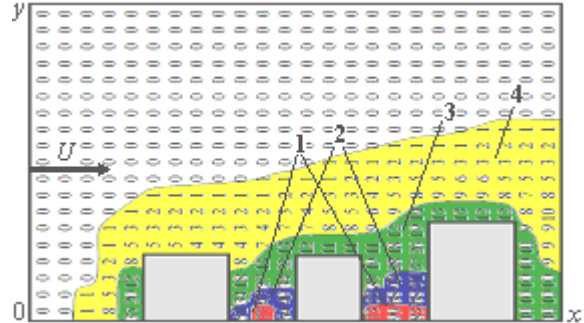


Рис. 10. Распределение концентрации CO,  $C_{\max} = 0,144 \text{ г/м}^3$  (первый сценарий)  
1 – 100–75 %; 2 – 74–41 %; 3 – 40–10 %; 4 – <10 %

Fig. 10. Concentration distribution of CO,  $C_{\max} = 0,144 \text{ г/м}^3$  (the first scenario)  
1 – 100–75 %; 2 – 74–41 %; 3 – 40–10 %; 4 – <10 %

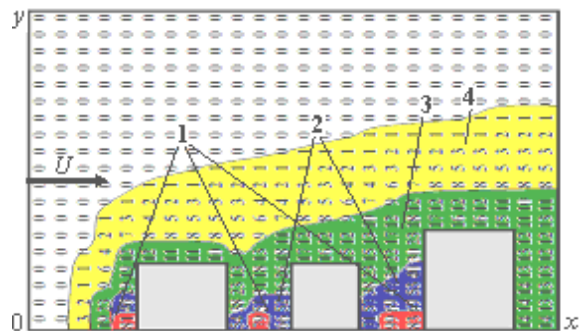


Рис. 11. Распределение концентрации CO,  $C_{\max} = 0,151 \text{ г/м}^3$  (второй сценарий)  
1 – 100–75 %; 2 – 74–41 %; 3 – 40–10 %; 4 – <10 %

Fig. 11. Concentration distribution of CO,  $C_{\max} = 0,151 \text{ г/м}^3$  (the second scenario)  
1 – 100–75 %; 2 – 74–41 %; 3 – 40–10 %; 4 – <10 %

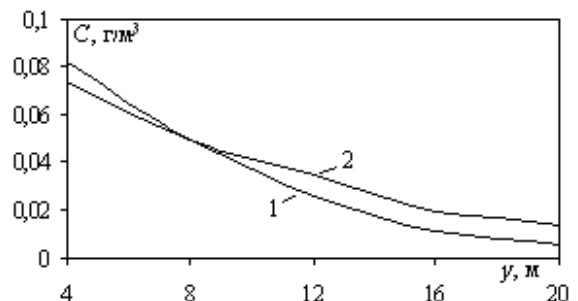


Рис. 12. Распределение концентрации загрязнителя за первым зданием:  
1 – первый сценарий; 2 – второй сценарий

Fig. 12. Concentration distribution of the pollutant behind the first building:  
1 – the first scenario; 2 – the second scenario



## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

На графике (рис. 12) показано распределение концентрации загрязнителя на подветренной стороне первого здания для каждого сценария.

Как видно из представленного рис. 12, расхождение по величине концентрации для различных сценариев наблюдается начиная с высоты 11 м и составляет примерно 8 %. Это связано с тем, что здание выполняет само по себе защитную функцию, т.е. является механическим препятствием на пути рассеивания загрязнителя.

### Научная новизна и практическая значимость

Разработана численная модель, а на ее основе пакет прикладных программ, позволяющий провести вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта на улицах при наличии группы зданий, расположенных по схеме «уличный каньон». Достоинством разработанной модели является возможность расчета рассеивания выбросов на улице с учетом изменения величины скорости ветра и вертикального коэффициента диффузии с высотой.

### Выводы

В данной работе разработана численная модель для моделирования загрязнения атмосферного воздуха на улицах при наличии группы зданий, расположенных по схеме «уличный каньон». Определение поля скорости ветрового потока, которое изменяется практически в каждой точке пространства по абсолютной величине и по направлению за счет образования застойных зон при обтекании зданий, представляет очень трудную задачу. Если же рассматривается группа зданий, расположенных по схеме «уличный каньон», и учитывается изменение величины скорости ветра с высотой, то применение метода дискретных вихрей [8] для решения гидродинамической задачи очень усложняет алгоритм расчета. Поэтому, для решения гидродинамической задачи при типичных ситуациях используется модель отрывных течений невязкой жидкости. Процесс переноса загрязняющих веществ на улицах моделируется с помощью нестационарного уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси. Для численного интегрирования уравнений модели используются неявные разностные схемы.

Проведение данного класса вычислительных экспериментов необходимо в случае реконструкции микрорайонов города, при проектировании и строительстве новых автомагистралей, изменении в структуре транспортных потоков внутри города.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоцерковский, С. М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. – Москва : Наука, 1988. – 232 с.
2. Беляев, Н. Н. Численное моделирование загрязнения воздушной среды на промплощадках / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 16. – С. 18–20.
3. Бруязкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
4. Головне управління статистики в Дніпропетровській області [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dnprstat.gov.ua>. – Загл. с экрана. – Проверено : 09.07.2014.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
6. Моделирование аварийных ситуаций на промышленных объектах и безопасность жизнедеятельности / Л. И. Антошкина, Н. Н. Беляев, Л. Ф. Долина, Е. Д. Коренюк. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2011. – 123 с.
7. Пшинько, А. Н. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях / А. Н. Пшинько, Н. Н. Беляев, П. Б. Машихина. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2011. – 168 с.
8. Русакова, Т. И. Прогнозирование загрязнения воздушной среды от автотранспорта на улицах и в микрорайонах города / Т. И. Русакова // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. академіка В. Лазаряна. – 2013. – № 6 (48). – С. 32–44.
9. Русакова, Т. И. Численное исследование структуры вихревого потока около высотных сооружений / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 10, т. 1. – С. 154–160.
10. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

11. Центральна геофізична обсерваторія [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cgo.org.ua>. – Загл. с екрана. – Проверено : 09.07.2014.
12. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
13. Шаталов, А. А. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа / А. А. Шаталов, М. В. Лисанов // Безопасность труда в пром-сти. – 2004. – № 9. – С. 46–52.
14. Berkowicz, R. A Simple Model for Urban Background Pollution / R. Berkowicz // Environmental Monitoring and Assessment. – 2000. – Vol. 65. – Iss. 1/2. – P. 259–267. doi: 10.1007/978-94-010-0932-4\_28.
15. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // Air Pollution Modeling and its Application XXI, NATO SPS Series C : Environmental Security, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
16. Härkönen, J. Regulatory dispersion modelling of traffic originated pollution: academic diss. in physics / J. Härkönen. – Helsinki : University of Helsinki, 2006. – 104 p.
17. 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, 1991. – № 12. – P. 3.
18. Sathe Yogesh, V. Air Quality Modeling in Street canyons of Kolhapur City, Maharashtra, India / V. Sathe Yogesh // Universal J. of Environmental Research and Technology. – 2012. – Vol. 2. – Iss. 2. – P. 97–105.

Т. І. РУСАКОВА<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос», Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, вул. Казакова, 18, корп. № 14, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 776 82 05, ел. пошта [rusackovat@yandex.ru](mailto:rusackovat@yandex.ru), ORCID 0000-0001-5526-3578

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ У «ВУЛИЧНИХ КАНЬЙОНАХ» МІСТА

**Мета.** Стаття присвячена аналізу стану атмосферного повітря при його забрудненні викидами автотранспорту в м. Дніпропетровськ, розробці чисельної моделі та прикладної обчислювальної програми для дослідження рівня забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту на вулицях міста за наявності декількох будівель, розміщених за схемою «вуличний каньйон». **Методика.** Для досягнення поставленої мети вивчено динаміку зміни концентрації різних шкідливих речовин, значення якої отримані зі стаціонарного поста спостереження за якістю повітряного середовища в м. Дніпропетровськ. Виконано оцінку рівня забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами автотранспорту (за даними Головного управління статистики в Дніпропетровській області). Розроблено методику чисельного розрахунку концентрації забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту. Для розв’язання гідродинамічної задачі по визначенню поля швидкості вітрового потоку на вулицях міста використовувалась модель відривних течій невязкої рідини; для розв’язання задачі по розрахунку процесу розсіювання забруднення – рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Для реалізації запропонованої методики використовувались неявні різницеві схеми. **Результати.** У роботі розроблено математичну чисельну модель, а на її основі створено пакет прикладних програм, що дозволяє оперативно проводити обчислювальні експерименти по оцінці рівня забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту на вулицях міста при наявності декількох будівель, розміщених за схемою «вуличний каньйон». У результаті проведених досліджень були встановлені закономірності по зміні концентрації оксиду вуглецю біля групи будівель при різній інтенсивності викиду забруднювача. **Наукова новизна.** Розроблено чисельну модель, що дозволяє враховувати гідродинамічний вплив групи будівель на розсіювання забруднюючих речовин при зміні величини швидкості вітру та вертикального коефіцієнту дифузії з висотою. **Практична значимість.** Проведення даного класу обчислювальних експериментів необхідне у випадку реконструкції мікрорайонів міста, при проектуванні та будівництві нових автомагістралей, при змінах в структурі транспортних потоків у середині міста.

**Ключові слова:** забруднюючі речовини; автотранспорт; метод відривних течій; невязка рідини; розсіювання викидів; різницева схема; «вуличний каньйон»

T. I. RUSAKOVA<sup>1\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Gonchar Dnipropetrovsk National University, Kazakov St., 18, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovat@yandex.ru, ORCID 0000-0001-5526-3578

## RESEARCH OF AIR POLLUTION FROM TRAFFIC IN «STREET CANYONS» OF CITY

**Purpose.** The article is devoted to state analyze of atmospheric air at its pollution with vehicle emissions in Dnipropetrovsk city, the development a numerical model and applied computing program for research of air pollution level with vehicle emissions on the streets when several buildings are located on the scheme «street canyon». **Methodology.** To achieve the research purpose it was studied the dynamic of change concentration of different pollutants that have been fixed on monitoring station of air quality in Dnipropetrovsk city. It was performed level assessment of air pollution from traffic (according to the Main Statistical Office in Dnipropetrovsk region). It was developed methodology for numerical calculation of concentration the atmospheric air pollution from vehicle emissions. To solve hydrodynamic task of determining velocity field of wind flow in streets the model of separated flows of an inviscid fluid was used; to solve the task of the calculation process of dispersion pollution the equation of convective-diffusion transfer of pollutant was used. To implement the proposed methodology we used implicit difference schemes. **Findings.** In the work a mathematical numerical model was developed and computing programs on its base were created. It allows conducting the computational experiments for evaluation the level of air pollution from vehicle emissions on the streets when several buildings are located on the scheme «street canyon». As a result of research regulations on change concentration of carbon monoxide near a considered group of buildings at different pollutant emissions were established. **Originality.** This numerical model was developed which allows accounting the hydrodynamic impact of group buildings on dispersion of pollutants when the wind speed and the vertical diffusion coefficient vary with height. **Practical value.** Conducting such class of computational experiments is necessary in the case of reconstruction of city microregions, during the planning and construction of new highways, change in the structure of traffic in the city.

**Keywords:** pollutants; traffic; separated flows method; inviscid fluid; dispersion of emissions; the difference scheme; «street canyon»

### REFERENCES

1. Belotserkovskiy S.M., Kotovskiy V.N., Nisht M.I. *Matematicheskoye modelirovaniye ploskoparallelnogo ot-ryvnoy obtekaniya tel* [Mathematical modeling of planeseparated flow around bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 232 p.
2. Belyaev N.N., Gunko Ye.Yu., Mashikhina P.B. Chislennoye modelirovaniye zagryazneniya vozdushnoy sredy na promplohchadkakh [Numerical modelling of pollution of the air environment at industrial sites]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 16., pp. 138-142.
3. Bruyatskiy Ye.V. *Teoriya atmosferynoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov* [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kiev, In-t gidromekhaniki NAN Ukrainy Publ., 2000. 443 p.
4. *Glavnoye upravleniye statistiki v Dnepropetrovskoy oblasti* [Department of Statistics in the Dnipropetrovsk region]. Available at: <http://www.dneprstat.gov.ua> (Accessed 09 July 2014).
5. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushhey sredy* [Mathematical modelling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
6. Antoshkina L.I., Belyayev N.N., Dolina L.F., Korenyuk Ye.D. *Modelirovaniye avariynykh situatsiy na promyshlennykh obektakh i bezopasnost zhiznedeyatelnosti* [Modelling emergencies at industrial facilities and the safety of life]. Dnipropetrovsk, Nova ideolohiia Publ., 2011. 123 p.
7. Pshinko A.N., Belyayev N.N., Mashikhina P.B. *Modelirovaniye zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennykh avariyyakh* [Modelling of air pollution in man-caused accidents]. Dnipropetrovsk, Nova ideolohiia Publ., 2011. 168 p.
8. Rusakova T.I. *Prognozirovaniye zagryazneniya vozdushnoy sredy ot avtotransporta na ulitsakh i microrayonakh goroda* [Prediction of air pollution from autotransport in streets and in districts of a city]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Sci-*

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- ence and Transport Progress. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2013, no. 6 (48), pp. 32-44.
9. Rusakova T.I., Karplyuk V.I. Chislennoye issledovaniye struktury vikhrevogo potoka okolo vysotnykh sooruzheniy [Numerical study of the structure of the vortex flow around high buildings]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya «Mekhanika»* [Bulletin of Dnipropetrovsk University, Series «Mechanics»], 2006, issue 10, vol. 1, pp. 154-160.
  10. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
  11. *Tsentralna heofizychna observatoriia* [Central Geophysical Observatory]. – Available at: <http://www.cgo.org.ua>. (Accessed 09 July 2014).
  12. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Belyayev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modelling of pollution in the environment]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1997. 368 p.
  13. Shatalov A.A., Lisanov M.V. Metodika rascheta rasprostraneniya avariynykh vybrosov, osnovannaya na modeli rasseivaniya tyazhelogo gaza [Method of spread calculation of accidental releases, based on the model of heavy gas dispersion]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti – Security of labor in the industry*, 2004, no. 9, pp. 46-52.
  14. Berkowicz R.A Simple Model for Urban Background Pollutio. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, vol. 65, pp. 259-267. doi: 10.1007/978-94-010-0932-4\_28.
  15. Biliaiev M.M., Kharytonov M.M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography. *Air Pollution Modeling and it's Application XXI, NATO SPS Series C: Environmental Security*, 2012, vol. 4, issue 1/2, pp. 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
  16. Härkönen J. Regulatory dispersion modeling of traffic originated pollution. Helsinki, University of Helsinki, 2006. 104 p.
  17. Murakami S., Mochida A., Yoshihiko H. Comparison of «k-ε» model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model. 8th Intern. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, 1991, no. 12, 3 p.
  18. Sathe Yogesh V. Air Quality Modeling in Street canyons of Kolhapur City, Maharashtra, India. *Universal Journal of Environmental research and Technology*, vol. 2, issue 2, pp. 97-105.

Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. О. Г. Гоманом (Украина); д.т.н., проф. Н. Н. Беляевым (Украина)

Поступила в редколлегию 20.10.2014

Принята к печати 16.12.2014