

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК [502.3:504.5:621.43.068.4]:656.13

Т. И. РУСАКОВА^{1*}

^{1*}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

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ОТ АВТОТРАНСПОРТА НА УЛИЦАХ И В МИКРОРАЙОНАХ ГОРОДА

Цель. Разработка прикладной численной модели для прогноза уровня загрязнения атмосферы на улицах и в микрорайоне города с учетом химических превращений загрязняющих веществ. **Методика.** Для решения гидродинамической задачи по определению поля скорости ветрового потока на улице использовался метод дискретных вихрей, в микрорайоне города – метод отрывных вихревых течений идеальной несжимаемой жидкости, для решения уравнения переноса примеси – попеременно-треугольная неявная разностная схема. **Результаты.** В работе построена эффективная численная модель по типу «уличный каньон» для прогноза качества воздушной среды на улицах города и в микрорайонах города при выбросах от автотранспорта с учетом химических превращений загрязняющих веществ. **Научная новизна.** Создана численная модель, позволяющая учесть влияние зданий на рассеивание загрязняющих веществ и, в тоже время, требующая небольших затрат компьютерного времени при практической реализации. Достоинством разработанной модели является возможность оперативного расчета рассеивания выбросов на улице с учетом химических превращений загрязняющих веществ. **Практическая значимость.** Разработанная численная модель может быть использована на практике при планировании автомагистралей в новых районах городов или при реконструкции старых, для проведения серийных расчетов, требующих перебора различных вариантов расположения зданий, автомагистралей при определенных метеоусловиях.

Ключевые слова: загрязняющие вещества; автотранспорт; метод дискретных вихрей; рассеивание выбросов; разностная схема; химические превращения

Введение

Автомобильный транспорт является одним из наиболее мощных источников эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу городов. Вследствие загрязнения воздушной среды вредными веществами отработавших газов двигателей внутреннего сгорания зоной экологического бедствия для населения становятся целые регионы, в особенности крупные города. Так как непрерывно увеличивается парк эксплуатируемых автотранспортных средств, уплотняются автотранспортные потоки и мероприятия по снижению содержания вредных веществ в процессе эксплуатации не всегда стабильны, то актуальной является проблема прогноза каче-

ства воздушной среды на улицах и в микрорайонах города, где проходят автомагистрали. В денежном исчислении величина ежегодного экологического ущерба: загрязнение атмосферы, шум, воздействие на климат от функционирования автотранспортного комплекса достигает 2–3 % валового национального продукта при общих экологических потерях 10 % и затратах на природоохранные мероприятия не более 1 %. Основная доля ущерба от автотранспорта (78 %) связана с загрязнением атмосферного воздуха выбросами вредных веществ, что во многом объясняется низким качеством отечественных топлив в сравнении с европейскими стандартами, а 16 % ущерба приходится на по-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

следствия шумового воздействия транспорта на население. При сгорании топлива в цилиндрах двигателей образуются нетоксичные (водяной пар, углекислый газ) и токсичные вещества. Последние являются продуктами сгорания или побочных реакций, протекающих при высоких температурах. К ним относятся окись углерода CO , углеводороды C_mH_n , окислы азота (NO и NO_2), обычно обозначаемые NO_x . Кроме перечисленных веществ, вредное воздействие на организм человека оказывают выделяемые при работе двигателей соединения свинца, канцерогенные вещества, сажа и альдегиды.

Прогноз загрязнения атмосферы на улицах от выбросов транспорта является важной задачей в области экологической безопасности. Такой прогноз нужен на этапе планирования новых и реконструкции старых жилых районов. Для практики необходимо иметь расчетные методики, которые позволяли бы проектировщику охватить типовые ситуации, связанные с формированием зон загрязнения на улицах. Также можно отметить, что задача данного класса является очень сложной с точки зрения теоретического решения. Сложность решения обусловлена тем, что здания на улицах представляют собой препятствия, влияющие на изменение поля скорости воздушного потока. Это изменение скорости оказывает влияние на распределение примеси в условиях застройки. Таким образом, для разработки адекватных математических моделей крайне важно учесть влияние зданий на формирование зоны загрязнения.

В настоящее время используется несколько классов математических моделей для решения задачи прогнозирования качества воздушной среды на улицах. Как правило, это эмпирические модели [4], аналитические модели – модель Гаусса [14, 19] и численные модели на базе уравнений Навье–Стокса [6, 8, 23]. Эмпирические и аналитические модели позволяют оперативно рассчитать поле концентрации загрязняющего вещества, но они не учитывают влияние положения зданий на улицах и их геометрических размеров на процесс формирования зоны загрязнения. Необходимо отметить, что численные модели, которые основаны на уравнениях Навье–Стокса, учитывают влияние зданий, но требуют значительного количества компьютерного времени (порядка нескольких

суток), что не позволяет применять эти модели для серийных расчетов. Кроме этого, как известно, в настоящее время существует большая проблема моделирования турбулентности. Даже общеизвестные модели турбулентности [23] дают достаточно плохие результаты при моделировании обтекания зданий. Следует подчеркнуть, что в настоящее время нет возможности широкого применения физического эксперимента (на базе аэродинамических труб, в гидравлических лотках) для прогноза качества воздушной среды на улицах. Это связано с тем, что для проведения такого рода эксперимента требуется уникальное оборудование, которое отсутствует в Украине. Также постановка и проведение аэродинамического эксперимента требует много времени и средств. В связи с перечисленными факторами, актуальной задачей является создание численных моделей, позволяющих учесть влияние зданий на рассеивание загрязняющих веществ и в то же время требующих небольших затрат компьютерного времени при практической реализации. С экологической точки зрения, при расчете качества воздушной среды на улицах в рамках данного класса задач также важно учесть процессы химической трансформации загрязнителей, выбрасываемых от автомобилей.

Цель

Целью данной работы является разработка прикладной численной модели для прогноза уровня загрязнения атмосферы на улицах и в микрорайоне города с учетом химических превращений загрязняющих веществ.

Методика

В первой части работы рассматривается процесс распространения загрязняющих веществ на улице для схемы размещения зданий по типу «уличный каньон» (рис.1) [20, 24]. Для прогноза качества воздушной среды необходимо предварительно решить гидродинамическую задачу по определению поля скорости ветрового потока на улице. Для моделирования процесса обтекания зданий потоком воздуха используется метод дискретных вихрей [1], который дает возможность быстро рассчитать поле скорости ветрового потока в условиях размещения зданий [11]. Решается задача об отрыв-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

ном нестационарному обтеканию двух зданий. Характерные размеры первого – ℓ_1 , h_1 , второго – ℓ_2 , h_2 , расстояние между ними – $\Delta\ell$ в плоской системе координат Oxy . Поток движется с постоянной скоростью $\vec{U}(\tau)$ вдоль положительной оси Ox . Параметры h_1 , h_2 , ℓ_1 , ℓ_2 , $\Delta\ell$ могут варьироваться в зависимости от высоты и способа расположения зданий. Для моделирования отрывного обтекания рассматриваемых тел у поверхности земли используются основная и зеркально отображенная вихревые системы [2].

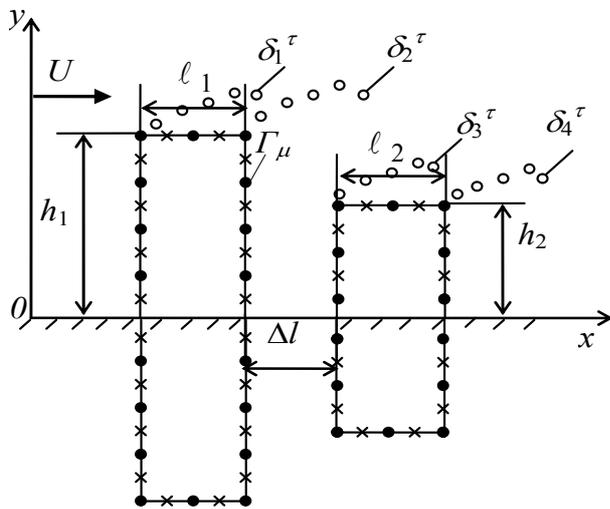


Рис. 1. Моделирование поверхности зданий системой дискретных вихрей (•) и контрольных точек (x)

Каждая из них состоит из присоединенных дискретных вихрей, циркуляции которых Γ_μ равны по величине и противоположны по знаку, и свободных δ_1^τ , δ_2^τ , δ_3^τ , δ_4^τ пелен, сходящих с изломов поверхностей в момент времени τ . Движение последних в обеих вихревых системах происходит симметрично. При таком разбиении на линии симметрии Ox автоматически в любой момент времени выполняется условие непротекания, что равносильно присутствию здесь поверхности земли.

Схема разбиения поверхностей включает: n контрольных точек, где выполняется граничное условие непротекания и n дискретных вихрей. Первые располагаются на линиях v , а вторые – на линиях μ между контрольными точками (см. рис. 1).

Циркуляции присоединенных вихрей Γ_μ на k -м шаге по времени определялись из решения системы линейных алгебраических уравнений (1), которая выражает собой условие непротекания поверхности и условие бесциркуляционного обтекания [9, 10].

$$\sum_{v=0}^n \left[\sum_{\mu=0}^n \Gamma_\mu (a_{v\mu} - a'_{v\mu}) = -\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_v \right] - \sum_{kk=1}^4 \sum_{i=1}^k \delta_{kk\ i} (a_{kk\ i} - a'_{kk\ i})_v, \quad (1)$$

где Γ_μ – циркуляция μ -го присоединенного вихря; $a_{v\mu}$, $a'_{v\mu}$ – нормальные составляющие скорости в v -й контрольной точке от μ -го присоединенного вихря основной и зеркально отображенной вихревых систем соответственно; $\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_v$ – косинус угла между вектором скорости потока $\vec{U}_\infty(\tau)$ и нормалью \vec{n} к поверхности тела в каждой контрольной точке; $(a_{kk\ i})_v$, $(a'_{kk\ i})_v$ – нормальные составляющие скорости в v -ой контрольной точке от i -ого свободного вихря основной и зеркально отображенной вихревых систем; kk – порядковый номер вихревой пелены; k – количество свободных вихрей в потоке в момент времени τ в соответствующей вихревой пелене kk . Для первого тела характерна схема разбиения, которая предполагает расположение у поверхности земли контрольных точек, а для второго тела – вихрей, чтобы система алгебраических уравнений (1) была замкнутой.

Известные значения циркуляций присоединенных дискретных вихрей Γ_μ в местах излома поверхности определяют циркуляции свободных вихрей Γ_{δ_1} , Γ_{δ_2} , Γ_{δ_3} , Γ_{δ_4} , сходящих с поверхности тел в момент времени τ .

Для расчета поля скорости используются основные зависимости [2, 11] (2), (3).

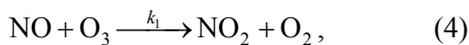
$$(V_x)_i = \sum_{r=1}^p \sum_{i=0}^n \Gamma_{\mu_r} (V_{x\mu_r} - V'_{x\mu_r})_i + \sum_{r=1}^p \sum_{j=1}^k \Gamma_{\delta_r} (V_{x\delta_r} - V'_{x\delta_r})_j + U_\infty(\tau), \quad (2)$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$(V_y)_i = \sum_{r=1}^p \sum_{i=0}^n \Gamma_{\mu_r} (V_{y\mu_r} - V'_{y\mu_r})_i + \sum_{r=1}^p \sum_{j=1}^k \Gamma_{\delta_r} (V_{y\delta_r} - V'_{y\delta_r})_j, \quad (3)$$

где Γ_{μ} – циркуляция μ -го присоединенного вихря, Γ_{δ_r} – циркуляция свободного вихря r -й вихревой пелены; $U_{\infty}(\tau)$ – скорость набегающего потока; $(V_x)_i$, $(V_y)_i$ – компоненты скорости в рассматриваемой точке плоскости (x_i, y_i) , которые можно рассчитать как сумму соответствующих компонент скорости от всей вихревой системы: присоединенных вихрей μ_r (компоненты $V_{x\mu_r}$, $V_{y\mu_r}$), которыми моделируются поверхности зданий, и свободных вихрей δ_r (компоненты $V_{x\delta_r}$, $V_{y\delta_r}$), сошедших с острых кромок, на данный момент времени τ основной и зеркально отображенной вихревой системы.

После вычисления поля скорости ветрового потока на улице решается задача по моделированию рассеивания газовых выбросов на улице при движении автотранспорта. Автомобили выбрасывают различные загрязняющие вещества. В настоящей работе рассматривается процесс химических превращений окиси азота и двуокиси азота. Эти химические превращения могут быть записаны в виде формул [15]



Как видно, из приведенных выше зависимостей, для образования NO_2 необходимо присутствие озона O_3 , и реакция взаимодействия протекает со скоростью, которая зависит от величины коэффициента k_1 , который определяется экспериментальным путем, как и коэффициент J , определяющий скорость превращения NO_2 в NO . Чтобы выполнить прогноз уровня загрязнения воздушной среды этими видами загрязнителей, нужно решить уравнения (6)–(8), где приведена запись уравнения переноса для конкретного загрязняющего вещества в той форме, которая принята за рубежом (в квадратных скобках записывается формула вещества) [3, 5, 7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{NO}]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{NO}]}{\partial x} + \frac{\partial v[\text{NO}]}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial[\text{NO}]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial[\text{NO}]}{\partial y}) + \\ + Q_{\text{NO}} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{NO}_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{NO}_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[\text{NO}_2]}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial[\text{NO}_2]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial[\text{NO}_2]}{\partial y}) + \\ + Q_{\text{NO}_2} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial[\text{O}_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[\text{O}_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[\text{O}_3]}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial[\text{O}_3]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial[\text{O}_3]}{\partial y}), \end{aligned} \quad (8)$$

где Q_{NO} – интенсивность выброса NO от автотранспорта, Q_{NO_2} – интенсивность выброса NO_2 от автотранспорта; u , v – компоненты вектора скорости ветра; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; x_0, y_0 – координаты источника выброса загрязняющего вещества; $\delta(x-x_0)$, $\delta(y-y_0)$ – дельта-функция Дирака, с помощью которой моделируется выброс загрязнителя. Значение коэффициента диффузии μ_y рассчитывается по формуле $\mu_y = 0,11 y$, где y – высота над уровнем Земли. $\mu_x = (0,1-1) U$, где U – скорость ветра [5].

Как известно, выброс NO_2 составляет величину порядка 5 % от выброса окиси азота, а остальная часть выброса (порядка 95 %) – это выброс NO . Для расчета процесса химической трансформации необходимо знать скорость химических превращений. Основываясь на анализе зарубежных публикаций [15, 16, 18, 19, 21, 22], в работе принято, что скорость химических превращений составляет: $J = 0,0045 \text{ s}^{-1}$; $k_1 = 0,00039 \text{ ppb}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Поскольку значение коэффициента k_1 приведено не в системных единицах концентрации, то в разработанной под-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

программе расчета химической трансформации осуществляется переход от значений концентрации в г/м^3 к значению в $\text{ppb}^{-1}\text{s}^{-1}$ и обратно. Процесс химической трансформации рассчитывается на основе зависимостей (9)–(11) [18, 20].

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = -k_1[\text{NO}][\text{O}_3] + J[\text{NO}_2], \quad (9)$$

$$\frac{d[\text{NO}_2]}{dt} = k_1[\text{NO}][\text{O}_3] - J[\text{NO}_2], \quad (10)$$

$$\frac{d[\text{O}_3]}{dt} = -k_1[\text{NO}][\text{O}_3] + J[\text{NO}_2]. \quad (11)$$

Постановка краевых условий для решения уравнения переноса рассмотрена в работах [5, 12]. Для численного интегрирования уравнений (6)–(8) используется попеременно-треугольная неявная разностная схема [6, 8, 13, 17]. Для этого осуществляется расщепление исходных уравнений таким образом, чтобы на разностном уровне неизвестное значение концентрации каждого загрязняющего вещества определялось по методу «бегущего счета».

Во второй части работы рассматривается математическая модель «микрорайон» и метод ее расчета. На практике возникает необходимость прогноза уровня загрязнения атмосферы в микрорайонах городов, т.е. когда необходимо изучить процесс рассеивания загрязнителей среди комплекса зданий. На первом шаге решается задача по определению поля скорости ветра при обтекании зданий (плановая задача). Для этого применяется модель отрывных вихревых течений идеальной несжимаемой жидкости [6, 13]. В этом случае базовыми уравнениями являются: уравнение переноса завихренности (12) и уравнение Пуассона для расчета функции тока (13):

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u \omega}{\partial x} + \frac{\partial v \omega}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega, \quad (13)$$

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

Компоненты вектора скорости ветрового

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

Так как отрыв потока происходит в угловых точках зданий, то в этих местах в поток сходят вихри, которые обеспечивают конечность скоростей в острых краях образующих, согласно постулата Чаплыгина–Жуковского, поэтому возникает задача расчета их интенсивности. Для решения этой задачи используется подход, рассмотренный в работе [6, 13].

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 соответствующие значения функции тока ψ и завихренности ω : $\psi|_{\text{вход}} = \psi(y)$, $\omega|_{\text{вход}} = \omega(y)$.

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 (12)–(13) и расчета поля скорости ветрового потока начинается решение задачи о переносе загрязняющих веществ на улицах (второй шаг). Для моделирования этого процесса используется уравнение переноса примеси в атмосфере [6, 13, 17]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (14)$$

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;

ЭКОЛОГИЯ НА ТРАНСПОРТИ

σ – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя; t – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [5, 6, 13].

Для формирования вида расчетной области, положения зданий, их формы используется метод маркирования расчетной области [13]. 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 [8, 17]. 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 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 $\frac{\Psi_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Psi_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{-}{2} \omega_{i,j}$;

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

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

Численное интегрирование уравнения переноса примеси проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [6, 13].

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:

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

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

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

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

Компоненты скорости u определяются на вертикальных гранях разностных ячеек, а ком-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

поненты скорости v – на горизонтальных гранях. Индексы этих граней соответствуют индексам ячеек, расположенных правее или выше соответствующей грани.

Вторые производные аппроксимируются следующим образом:

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

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

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

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

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

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

$$c = n + \frac{1}{4}$$

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

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

$$c = n + \frac{1}{2}$$

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

$$\text{– на четвертом шаге расщепления } k = n + 1,$$

$$c = n + \frac{3}{4}$$

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

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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

Практическая реализация модели «уличный каньон». Разработанная численная модель была применена для расчета концентрации NO_2 на улице при выбросе окиси азота NO_x от автотранспорта (рис. 2).

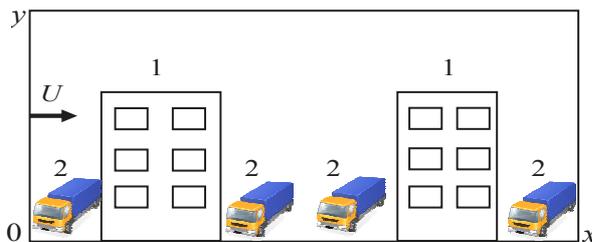


Рис. 2. Схема расчетной области:
1 – здания; 2 – места эмиссии загрязнителей

Расчет выполнялся при следующих данных: высота первого – 12 м, длина – 20 м; высота второго – 12 м, длина – 15 м; скорость ветра – 4 м/с; коэффициенты атмосферной диффузии $\mu_x = \mu_y = 2 \text{ м}^2/\text{с}$; размеры расчетной области: длина – 125 м, высота – 42 м; располагались четыре источника выброса NO_x интенсивностью $Q = 5 \text{ г}/(\text{м}\cdot\text{с})$ каждый.

В качестве начального условия задавалось, что фоновая концентрация NO и NO_2 в расчетной области равна нулю, а концентрация O_3 принята равной $0,16 \text{ мг}/\text{м}^3$. Результаты расчета представлены на рис. 3; 4.

Как видно из рис. 4 на улице формируется сложная зона загрязнения, вызванная взаимодействием четырех источников выброса NO_x и зданий. Эта зона загрязнения охватывает оба здания, т.е. создается риск поступления опасного загрязнителя внутрь жилых помещений каждого здания.

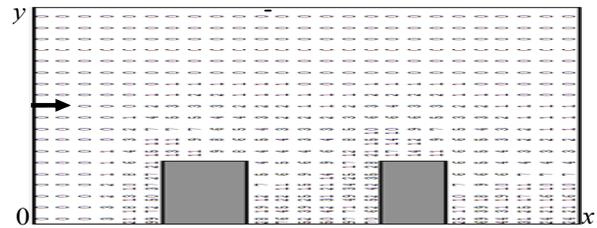


Рис. 3. Распределение концентрации NO_2 на улице в момент времени $t = 10 \text{ с}$

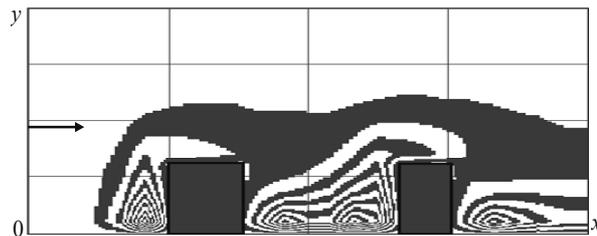


Рис. 4. Распределение концентрации NO_2 на улице в момент времени $t = 12,5 \text{ с}$

Практическая реализация модели «микрорайон». Разработанная численная модель была применена для решения следующей задачи: рассматривается микрорайон города, через который проходит три автомагистрали (рис. 5). Расчет выполнялся при следующих расчетных данных: интенсивность выброса на автомагистрали 1–1 диоксида азота составляет $Q = 0,008 \text{ г}/(\text{м}\cdot\text{с})$; на магистрали 2–2 и 3–3 интенсивность диоксида азота составляет $Q = 0,003 \text{ г}/(\text{м}\cdot\text{с})$; скорость ветра – 5,5 м/с; коэффициенты атмосферной диффузии $\mu_x = \mu_y = 2 \text{ м}^2/\text{с}$; размеры расчетной области: длина – 250 м, высота – 210 м.

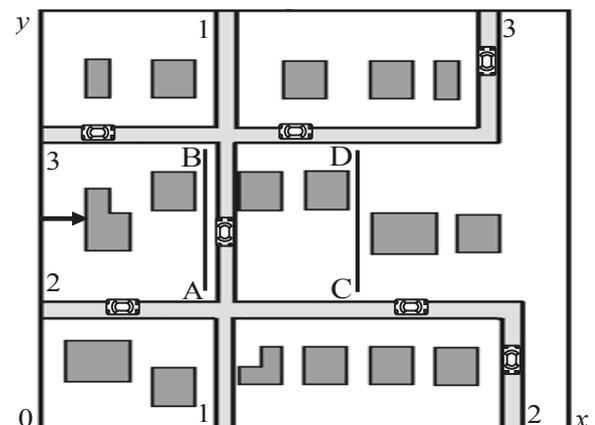


Рис. 5. Схема расчетной области:
1–1, 2–2, 3–3 – дороги (места эмиссии загрязнителя)

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Результати расчета концентрации диоксида азота в микрорайоне показаны на рис. 6, 7, где значение концентрации представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени.

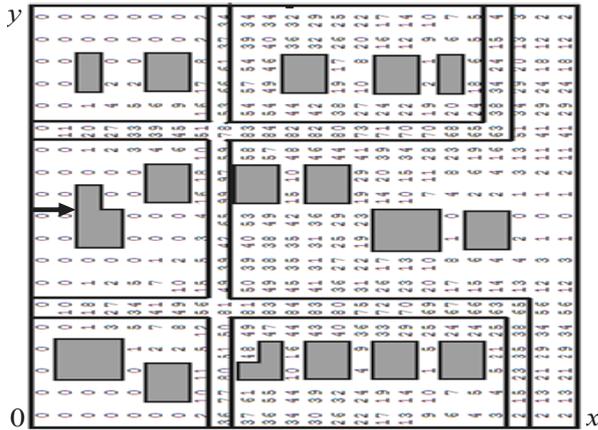


Рис. 6. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 10$ с, $C_{\max} = 0,309 \cdot 10^{-3}$

Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выводится на печать. Это значит, что если, например, в какой-то точке расчетное значение концентрации составляет 9,4 % от максимальной концентрации, то на печать будет выведено число «9». Этот вывод результатов на печать эффективен при проведении серийных расчетов, когда осуществляется «перебор» различных вариантов в целях выбора наиболее оптимального для конкретной ситуации.

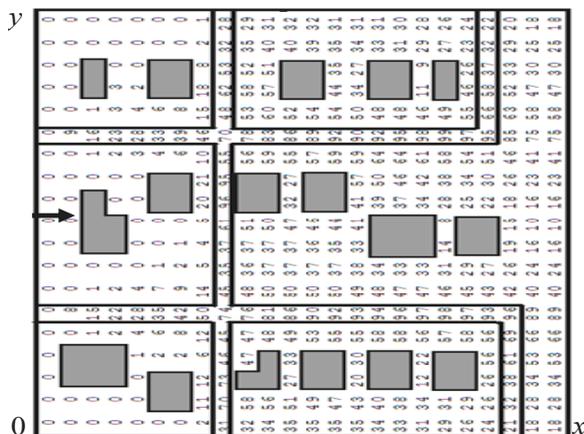


Рис. 7. Зона загрязнения атмосферы для момента времени $t = 20$ с, $C_{\max} = 0,373 \cdot 10^{-3}$

Указанное представление результатов расчета в виде «целых» чисел позволяет оперативно анализировать информацию относительно величины концентрации в любой части расчетной области. Однако по требованию пользователя разработанный код осуществляет вывод на печать результатов по формату «действительное число», т.е. с сохранением дробной части числа.

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 выполнить анализ уровня загрязнения воздушной среды на улицах в любом интересующем месте. Например, на рис. 8 показана динамика изменения концентрации диоксида азота для установившегося процесса ($t = 150$ с) вдоль улиц, которые на рис. 4 условно показаны линиями AB и CD . Как видно, с помощью разработанной модели можно детально определить зоны, где происходит превышение ПДК по данному загрязнителю, и зоны, безопасные для населения.

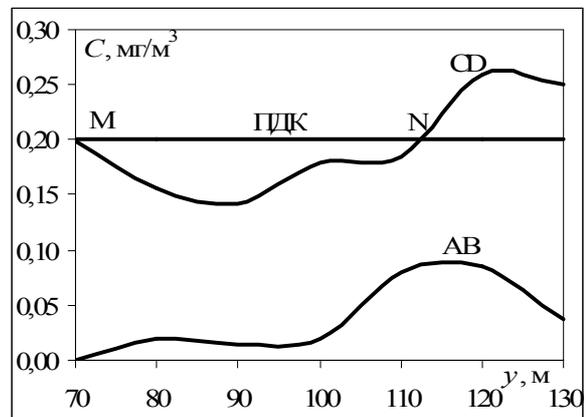


Рис. 8. Изменение концентрации NO_2 вдоль выделенных участков улиц AB и CD в сравнении с ПДК ($t = 150$ с, $C_{\max} = 0,47 \text{ мг/м}^3$, $U = 5,5 \text{ м/с}$, $\mu_x = \mu_y = 2 \text{ м}^2/\text{с}$)

Как следует из рис. 8, вдоль улицы AB значение концентрации NO_2 не превышает своего значения по санитарной норме, так как эта улица находится перед автомагистралью 1–1 и воспринимает загрязнение, идущее от автомагистралей 2–2 и 3–3. На участке MN улицы CD кон-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

центрація NO_2 нижче ПДК, а на остальному участку вулиці має місце перевищення ПДК приблизно на 35 %, так як ця вулиця сприймає забруднення від автомагістралі 1–1 за напрямком вітру, де інтенсивність викисту NO_2 більше, ніж на інших автомагістралях. Між вулицею *CD* та автомагістраллю 1–1 знаходяться два будинки, які перешкоджають розповсюдженню забруднювача, тому саме на ділянці вулиці *CD*, який знаходиться за цими будинками, концентрація NO_2 більше, ніж на всій рештці її довжини, де немає будинків.

Научная новизна и практическая значимость

Сформована чисельна модель, що дозволяє врахувати вплив будинків на розповсюдження забруднюючих речовин і в той же час вимагає невеликих витрат комп'ютерного часу при практичній реалізації. Перевагою розробленої моделі є можливість оперативного розрахунку розповсюдження викистів на вулиці з урахуванням хімічних перетворень забруднюючих речовин.

Выводы

В даній роботі розглянуті дві чисельні моделі для прогнозування якості повітряної середовища на вулицях міст. Для розв'язання задачі гідродинаміки, пов'язаної з обтеканням будинків, використовується модель ідеальної рідини. Процес переносу забруднюючих речовин на вулицях моделюється за допомогою нестационарного рівняння конвективно-дифузійного переносу приміси. Для чисельного інтегрування рівнянь моделі використовуються неявні різницеві схеми. Особливістю розроблених моделей є оперативність у отриманні прогнозних даних. Розроблені моделі можуть бути використані при проведенні серійних розрахунків, коли необхідно розглянути різні варіанти планування мікрорайонів і розташування в них автомагістралей. Даліше дослідження по даній темі слід проводити в напрямку створення тривимірних моделей прогнозу якості повітряної середовища на вулицях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоцерковский, С. М. Моделирование отрывного обтекания цилиндра вблизи экрана / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ // Инженерно-физ. журн. – 1986. – № 2. – С. 78–84.
2. Белоцерковский, С. М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. – М. : Наука, 1988. – 232 с.
3. Беляев, Н. Н. Численное моделирование загрязнения воздушной среды на промплощадках / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 16. – С. 18–20.
4. Бруязкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязкий. – К. : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
5. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М. : 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. – Д. : Нова ідеологія, 2011. – 123 с.
7. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
8. Пшинько, А. Н. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях / А. Н. Пшинько, Н. Н. Беляев, П. Б. Машихина. – Д. : Нова ідеологія, 2011. – 168 с.
9. Русакова, Т. И. Численное исследование структуры вихрового потока около высотных сооружений / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Д., 2006. – Вип. 10, т. 1. – С. 154–160.
10. Русакова, Т. И. Задача численного расчета обтекания зданий воздушным потоком / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Д., 2007. – Вип. 11, т. 1. – С. 53–58.
11. Русакова, Т. И. Исследование поля скоростей при обтекании зданий воздушным потоком / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Д., 2008. – Вип. 12, т. 1. – С. 41–49.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

12. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1983. – 616 с.
13. 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.
14. 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.
15. Berkowicz, R. A Simple Model for Urban Background Pollution / R. Berkowicz // Environmental Monitoring and Assessment. – 2000. – Vol. 65. – P. 259–267.
16. Berkowicz, R. OSPM – a Parameterised Street Pollution Model / R. Berkowicz // Environmental Monitoring and Assessment. – 2000. – Vol. 65. – P. 323–331.
17. Biliaiev, M. M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security Series C : Environmental Security. – 2012. – Vol. 4. – P. 87–91.
18. Denby, Br. Modelling of Nitrogen Dioxide (NO₂) for air quality assessment and planning relevant to the European Air Quality Directive [Electronic resource] / B. R. Denby. – 2011. – P. 89. – Access Mode: http://acm.eionet.europa.eu/reports/docs/ETCACM_TP_2011_15_FAIRMODE_guide_modelling_NO2.pdf. – Title from the screen.
19. Hanna, S. Air Quality Modeling Over Short Distances / S. Hanna // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling. – 1994. – № SMR/760-2. – P. 712–743.
20. Härkönen, J. Regulatory dispersion modeling of traffic originated pollution : academic diss. in physics / J. Härkönen ; University of Helsinki. – Helsinki, 2006. – 104 p.
21. Hertel, O. Modelling NO₂ concentrations in a street canyon / O. Hertel, R. Berkowicz // DMU Luft. – 1989. – № A-131. – P. 31.
22. Kessler, Ch. Estimation of NO₂/NO_x relations of traffic emissions in Baden-Wurttemberg from 1995 to 2005 / Ch. Kessler, A. Niederau, W. Scholz // 2 Conf. Environment Transport, incl. 15th Conf. Transport and Pollution. – Reims, 2006. – P.101–105.
23. 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.
24. 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^{1*}

^{1*}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 gusackovat@yandex.ru

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА ВІД АВТОТРАНСПОРТУ НА ВУЛИЦЯХ ТА В МІКРОРАЙОНАХ МІСТА

Мета. Розробка прикладної чисельної моделі для прогнозу рівня забруднення атмосфери на вулицях та в мікрорайонах міста з урахуванням хімічних перетворень забруднюючих речовин. **Методика.** Для розв'язання гідродинамічної задачі з визначення поля швидкості повітряного потоку на вулиці міста використовувався метод дискретних вихорів, у мікрорайоні міста – метод відривних вихорів течій ідеальної нестисливої рідини, для розв'язання рівняння переносу домішок – поперемінно-трикутна неявна різницева схема. **Результати.** У роботі побудована ефективна чисельна модель типу «вуличний каньйон» для прогнозу якості повітряного середовища на вулицях міста та в мікрорайонах міста при викидах від автотранспорту з урахуванням хімічних перетворень забруднюючих речовин. **Наукова новизна.** Створена чисельна модель, що дозволяє врахувати вплив будівель на розсіювання забруднюючих речовин і, у той же час, потребує невеликих затрат комп'ютерного часу при практичній реалізації. Перевагою розробленої моделі є можливість оперативного розрахунку розсіювання викидів на вулиці чи в мікрорайоні з урахуванням хімічних перетворень забруднюючих речовин. **Практична значимість.** Розроблена чисельна модель може бути використана на практиці при плануванні автомагістралей в нових районах міста або при реконструкції старих для проведення серійних розрахунків, які потребують перегляду різних варіантів розміщення будівель, автомагістралей при конкретних метеоумовах.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Ключові слова: забруднюючі речовини; автотранспорт; метод дискретних вихорів; розсіювання викидів; різницєва схема; хімічні перетворення

T. I. RUSAKOVA^{1*}

^{1*}Dep. «Aerohydrodynamics and Masstransfer», Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Kazakova St., 18, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 776 82 05, e-mail rusakovat@yandex.ru

PREDICTION OF AIR POLLUTION FROM MOTOR TRANSPORT ON CITY STREETS AND DISTRICTS

Purpose. Development of applied numerical model for prediction of atmospheric pollution rate on streets and districts of a city taking into account chemical transformations of pollutants. **Methodology.** To solve hydrodynamic task of determining velocity field of wind flow in street the method of discrete vortices was used, in the city district – the method of separation flows vortex of ideal incompressible fluid, for solution equation of pollutant transfer – alternating triangular implicit difference scheme. **Findings.** An efficient numerical model using the type of «street canyons» for prediction of air quality on city streets and districts with emissions from motor transport considering chemical transformations of pollutants was designed in the work. **Originality.** The numerical model, which allows taking into account impact of buildings on pollutants dispersion and requiring a small consumption of computer time during practical realization was created. The advantage of the model is the possibility of rapid calculation of emissions dispersion in the street with considering the chemical reactions of pollutants. **Practical value.** The developed numerical model can be used in practice during the planning of new highways in new urban areas or in the renovation of old ones, for a series of calculations that require search of different variants for arrangement of buildings, highways, under certain weather conditions.

Keywords: pollutants; motor transport; method of discrete vortices; dispersion of emissions; the difference scheme; chemical transformations

REFERENCES

1. Belotserkovskiy S.M., Kotovskiy V.N., Nisht M.I. Modelirovaniye otryvnogo obtekaniya tsilindra vblizi ekrana [Modelling peel strength flow past a cylinder close to the screen]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Journal of Engineering Physics*, 1986, no. 2. pp. 78-84.
2. Belotserkovskiy S.M., Kotovskiy V.N., Nisht M.I. *Matematicheskoye modelirovaniye ploskoparallelnogo otryvnogo obtekaniya tel* [Mathematical modelling of plane separated flow around bodies]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 232 p.
3. Belyayev 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, issue16, pp. 138-142.
4. Bruyatskiy Ye.V. *Teoriya atmosfernooy diffuzii radioaktivnykh vybrosov* [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kyiv, In-t gidromekhaniki NAN Ukrainy Publ., 2000. 443 p.
5. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey 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 ob'yektakh i bezopasnost zhiznedeyatelnosti* [Modelling emergencies at industrial facilities and the safety of life]. Dnipropetrovsk, Nova ideologiya Publ., 2011. 123 p.
7. Mashikhina P.B. Modelirovaniye rasprostraneniya primesi v atmosfere s uchetom relyefa mestnosti [Modelling of distribution of impurity in the atmosphere taking into account a land relief]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 138-142.
8. 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 ideologiya Publ., 2011. 168 p.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

9. Rusakova T.I., Karplyuk V.I. Chislennoye issledovaniye struktury vikhrovogo 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. Rusakova T.I., Karplyuk V.I. Zadacha chislennogo rascheta obtekaniya zdaniy vozdushnym potokom [Problem of numerical calculation of the percolation buildings airflow]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya. «Mekhanika»* [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series «Mechanics»], 2007, issue 11, vol. 1, pp. 53-58.
11. Rusakova T.I., Karplyuk V.I. Issledovaniye polya skorostey pri obtekaniy zdaniy vozdushnym potokom [Study of the velocity field in the flow around buildings airflow]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya. «Mekhanika»* [Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series «Mechanics»], 2008, issue 12, vol. 1, pp. 41-49.
12. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
13. 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.
14. 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.
15. Berkowicz R.A. Simple Model for Urban Background Pollutio. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, vol. 65, pp. 259-267.
16. Berkowicz R. OSPM – a Parameterised Street Pollution Model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, vol. 65, pp. 323-331.
17. Biliaiev M.M., Kharytonov M.M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*, 2012, vol. 4, pp. 87-91.
18. Denby, Br. Modelling of Nitrogen Dioxide (NO₂) for air quality assessment and planning relevant to the European Air Quality Directive, 2011, p. 89. Available at: http://acm.eionet.europa.eu/reports/docs/ETCACM_TP_2011_15_FAIRMODE_guide_modelling_NO2.pdf. (Accessed 27 November 2013).
19. Hanna S. Air Quality Modeling Over Short Distances. *College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modeling*, 1994, no. SMR/760-2, pp. 712-743.
20. Härkönen J. Regulatory dispersion modeling of traffic originated pollution. Academic Diss. Helsinki, 2006. 104 p.
21. Hertel O., Berkowicz R. Modelling NO₂ concentrations in a street canyon. *DMU Luft*, 1989, no. A-131, 31 p.
22. Kessler Ch., Niederau A., Scholz W. Estimation of NO₂/NO_x relations of traffic emissions in Baden-Württemberg from 1995 to 2005. 2 Conf. Environment Transport, incl. 15th conf. Transport and Pollution. Reims, 2006, pp.101-105.
23. 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 Int. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, 1991, no. 12, 3 p.
24. 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 21.10.2013

Принята к печати 11.11.2013