

УДК 519.6:504.3.054

Н.Н. Беляев¹, д-р техн. наук, проф.,
Т.И. Русакова², канд. техн. наук,
В.Е. Колесник³, д-р техн. наук, проф.,
А.В. Павличенко³, канд. биол. наук, доц.

1 – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: gidravlika2013@mail.ru

2 – Днепропетровский национальный университет им. О. Гончара, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: rusackovat@yandex.ru

3 – Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: kafedra_ecology@ukr.net

ПРОГНОЗ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ГОРОДСКИХ АВТОМАГИСТРАЛЕЙ

М.М. Biliaiev¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
T.I. Rusakova², Cand. Sci. (Tech.),
V.Ye. Kolesnik³, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
A.V. Pavlichenko³, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof.

1 – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: gidravlika2013@mail.ru

2 – Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: rusackovat@yandex.ru

3 – State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: kafedra_ecology@ukr.net

THE PREDICTED LEVEL OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN THE CITY AREA AFFECTED BY HIGHWAYS

Цель. Разработка методики оценки загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния городских автомагистралей, базирующейся на уравнениях отрывных течений невязкой жидкости, учитывающих специфику жилой застройки, а также закономерности химических превращений загрязняющих веществ.

Методика. Прогноз уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах города основывается на совместном решении гидродинамической задачи по определению поля скорости ветрового потока в зоне городской автомагистрали и задачи по переносу примесей в атмосфере. Для определения поля скорости ветрового потока использовали метод отрывных вихревых течений идеальной несжимаемой жидкости. Закономерности переноса примесей в атмосфере устанавливали с помощью уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси и ее химической трансформации в атмосфере. Прогноз концентраций загрязняющих веществ производился путем численного моделирования на прямоугольной разностной сетке с использованием метода маркирования расчетной области на основе попеременно-треугольной разностной схемы.

Результаты. Разработанная методика позволяет оперативно прогнозировать уровни загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта при расположении зданий и автомагистрали по типу „уличный каньон“ с учетом химических превращений загрязняющих веществ. Применение разработанной численной модели позволило на практике установить динамику содержания диоксида азота в воздухе у зданий, примыкающих к автомагистрали. Проведен сравнительный анализ изменения концентрации диоксида азота относительно его предельно допустимой концентрации в атмосферном и среднегодовых значений.

Научная новизна. Разработана методика оценки уровней загрязнения атмосферного воздуха на разных расстояниях от автомагистрали, которая позволяет учитывать специфику химических превращений загрязняющих веществ в воздухе и влияние структуры жилой застройки на их рассеивание.

Практическая значимость. Разработанная прогнозная методика может быть использована при планировании автомагистралей в новых районах городов или при реконструкции старых для проведения серий расчетов, требующих перебора различных вариантов расположения зданий и автомагистралей при определенных метеорологических условиях. Полученные закономерности распространения загрязняющих веществ на разных удалениях от автомагистрали рекомендуется применять для своевременного внедрения природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: автотранспорт, магистраль, загрязнение воздуха, рассеивание выбросов

Постановка проблемы. Транспорт является самой динамической отраслью, которая имеет большое значение для экономики любого государства. При этом транспорт оказывает существенное влияние на компоненты экологических систем, и, как следствие, на состояние здоровья населения [1].

Транспортные средства негативно влияют на состояние окружающей среды и при этом, чаще всего, оказывают наибольшее воздействие на атмосферу, загрязняя ее химическими соединениями, содержащимися в выхлопных газах. Так автомобиль может выбрасывать в атмосферу более 200 компонентов, период существования которых длится от нескольких минут до 4–5 лет. Химический состав выбросов зависит от вида и качества топлива, технологии производства, способа сжигания в дви-

© Беляев Н.Н., Русакова Т.И., Колесник В.Е., Павличенко А.В., 2016

гатель и технического состояния транспортных средств. Наибольшую опасность для окружающей среды представляют следующие компоненты – оксид углерода, оксиды азота, углеводороды, альдегиды (формальдегид и акролеин), соединения серы, свинец, сажа и др. [2].

Постоянный рост автомобильного парка вызывает значительное загрязнение окружающей среды крупных городов, и вклад автотранспорта в загрязнение воздуха выхлопными газами может достигать 80–95%. Объем транспортных выбросов вредных веществ в атмосферу на дорогах общего пользования почти в два раза больше объема выбросов промышленных предприятий. Ежегодные объемы промышленных выбросов CO , C_xH_y , NO_x в 5–10 раз меньше объемов выбросов этих веществ транспортными средствами.

Транспортные потоки оказывают наибольшее влияние на уровень загрязнения окружающей природной среды. Специфика передвижных источников загрязнения (автомобилей) проявляется:

- в высоких темпах роста количества автомобилей и их неравномерном распределении по территории города;
- непосредственной близости к жилым районам (автомобили заполняют все местные проезды и дворы жилой застройки);
- более высокой токсичности выбросов автотранспорта по сравнению с выбросами стационарных источников;
- сложности технической реализации средств защиты от загрязнений на передвижных источниках;
- низком расположении источника загрязнения от земной поверхности, в результате чего отработавшие газы автомобилей скапливаются в зоне дыхания людей и медленнее рассеиваются ветром.

Выхлопные газы автотранспорта распространяются непосредственно на улицах городов вдоль автомагистралей. Это приводит к негативному влиянию на пешеходов, жителей прилегающих микрорайонов, представителей животного и растительного мира. Экологическая ситуация усложняется тем, что загрязняющие вещества накапливаются в приземном слое, а именно в зоне дыхания человека [1, 3]. При этом протекает множество химических превращений загрязняющих веществ в воздухе [4]. Интенсивность рассеивания загрязняющих веществ зависит от характера застройки, климатических условий, а также интенсивности транспортных потоков.

Перечисленные особенности передвижных источников выбросов приводят к тому, что автотранспорт создает в городах обширные зоны с устойчивым превышением санитарно-гигиенических нормативов загрязнения атмосферного воздуха. Такая ситуация обуславливает необходимость разработки методических подходов к оперативной и достоверной оценке характера и степени загрязнения окружающей среды на территориях, прилегающих к автомагистралям.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время возрастают экологические требования и ограничения к автомобильному транспорту. Так, одним из основных принципов Транспортной стратегии Украины на период до 2020 года, утвержденной Распо-

ряжением Кабинета Министров Украины № 2174-р от 20.10.2010 г. является минимизация вредного влияния транспорта на окружающую природную среду.

Функционирование транспорта вызывает формирование значительных нагрузок практически на все компоненты экологических систем. Решению задач повышения экологической безопасности автомобильного транспорта посвящены работы Аксенова В.И., Аксенова И.Я., Батурина В.К., Бондаренко Е.В., Болбаса М.М., Воробьева А.Е., Внуковой Н.В., Вучика В.Р., Говоруна А.Г., Голубева И.Р., Гутаревича Ю.Ф., Дворникова Г.П., Зеркалова Д.З., Евгеньева И.Е., Луканина В.Н., Орнатского Н.П., Павловой Е.И., Савича Е.Л., Скорченко В.Ф., Хомяка Я.В., Яхьяева Н.Я. и др.

В крупных городах общее число автомобильных магистралей с интенсивным движением стремительно растет. В таких условиях выбросы автотранспорта в атмосферу оказывают существенное влияние на уровень концентрации загрязнителей в воздухе как вдоль самой городской магистрали, так и на определенном удалении от нее. Территорию современных городов пересекает большое количество автомобильных магистралей с интенсивным движением транспорта. Каждая из них оказывает влияние на уровень концентраций загрязняющих веществ в воздухе как вдоль самой магистрали, так и на разном удалении от нее [5].

Задача прогноза уровня загрязнения воздуха в таких условиях является очень сложной с точки зрения теоретического решения. Сложность обусловлена тем, что городские здания представляют собой препятствия, которые влияют на формирование поля скорости воздушного потока, а изменения скорости оказывают влияние на распределение загрязняющей примеси в зоне жилой застройки.

В рамках решения указанных прогнозных задач выполнено много исследований разными авторами [1, 6–8]. При этом они использовали эмпирические, аналитические и численные модели переноса примесей в атмосфере. Разработанные математические модели не в полной мере учитывают особенности распространения загрязняющих веществ в сторону жилой застройки и не определяют влияние зданий на формирование зоны и степени загрязнения воздуха. Кроме того, важно учитывать возможные химические трансформации примесей в атмосфере. Поэтому решение указанной задачи актуально для обеспечения экологической безопасности города.

Выделение нерешенной проблемы. Негативное влияние выбросов автотранспорта на атмосферу города по многим аспектам достаточно значительно. Прежде всего, загрязнители поступают в атмосферу жилой зоны на уровне прямого восприятия пешеходами. Вынос загрязнителей из „уличного каньона“ (рис. 1), образованного рядами домов по бокам автомагистрали, происходит менее интенсивно, чем на открытой местности, что приводит к образованию застойных зон, особенно в периоды малой интенсивности ветра. Под действием солнечного света в выбрасываемых автотранспортом газах протекают фотохимические реакции. И образуется фотохимический смог [4]. Его наиболее опасными компонентами являются озон, оксид и диоксид азота.

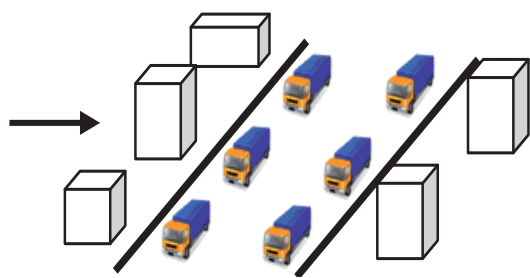


Рис. 1. Схема движения в „уличном каньоне“

Для выявления закономерностей переноса примесей в атмосфере могут быть использованы эмпирические модели, полученные путем обработки результатов измерений, проведенных непосредственно на улицах возле автомагистралей [4–10]. За рубежом эти модели используются для решения прогнозных задач в масштабе „local“. В Украине нормативная эмпирическая модель применяется для прогноза в масштабе „urban“. Следует отметить, что эти эмпирические модели в явном виде не учитывают процесс атмосферной диффузии, неравномерность поля скорости ветрового потока в застройке, а также влияние зданий на формирование зоны загрязнения на улицах городов. При этом модели могут быть построены только для одного вида загрязнителя.

Аналитические модели основаны на аналитическом решении уравнения переноса примеси, разработанные Hanna S., и используются для решения задач как в масштабе „local“, так и в масштабе „urban“. При этом аналитические модели имеют существенные ограничения. Они не учитывают неравномерность поля скорости ветра на улице, форму зданий и их взаимное расположение. Расчет зон загрязнения проводится по заданному значению скорости ветра. Модели данного класса используются при решении экологических задач в рамках разработки регуляторной политики.

Численные модели – это самый мощный теоретический инструмент для решения сложных задач по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха, в частности, выбросами автотранспорта на улицах городов. Данные модели делятся на две подгруппы: кинематические и CWE модели. Анализ известных численных моделей позволяет выделить следующие их достоинства: возможность моделирования с учетом комплекса наиболее важных физических факторов (неравномерности распределения скорости ветрового потока и атмосферной диффузии, учета влияния зданий, режима эмиссии вредных веществ); возможность получения прогнозных данных в любой интересующей точке; возможность представления результатов прогнозирования в виде, удобном для анализа. К недостаткам численных моделей следует отнести: сложность построения расчетной области в дискретном виде; трудность построения алгоритма решения задачи в областях сложной геометрической формы; большие затраты времени на проведение вычислительного эксперимента.

Формулирование цели работы. С учетом вышеизложенного, целью работы является разработка приклад-

ной математической модели переноса примесей на базе уравнений отрывных течений невязкой жидкости и ее применение для прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта с учетом химических превращений загрязнителей в атмосфере при расположении зданий и автомагистрали по схеме „уличный каньон“.

Изложение основного материала. На первом этапе решалась задача по определению поля скорости ветрового потока на улице. Для моделирования процесса обтекания зданий потоком воздуха используется уравнение переноса завихренности

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

и уравнение Пуассона для расчета функции тока

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

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

$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$ – компоненты вектора скорости

ветрового потока в вертикальной плоскости.

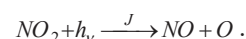
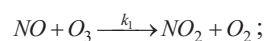
Так как отрыв потока происходит в угловых точках и на ребрах зданий, то в этих местах в поток сходят вихри, которые обеспечивают конечность скоростей в острых краях образующих (согласно постулату Чаплыгина-Жуковского). Поэтому, возникает задача расчета интенсивности сошедших вихрей.

Для уравнения Пуассона граничное условие „непротекания“ на поверхности препятствий имеет вид $\psi = 0$. На границе входа воздушного потока в расчетную область задавали вектор скорости воздушного потока, значения функции тока ψ и завихренности ω : $\psi|_{\text{вход}} = \psi(y)$, $\omega|_{\text{вход}} = \omega(y)$. На верхней границе расчетной области также задается условие „непротекания“: $\psi = \text{const}$.

На границе выхода воздушного потока из расчетной области задавали „мягкие“ граничные условия, необходимые для замыкания разностных уравнений.

Решение стационарной гидродинамической задачи определяли для задаваемых моментов 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 решали задачу по моделированию рассеивания выхлопных газов автотранспорта. Рассматривался процесс химических превращений оксида азота и диоксида азота в виде формул



Как видим, для образования NO_2 необходимо присутствие озона O_3 . Реакция взаимодействия оксидов протекает со скоростью, зависящей от коэффициента k_1 . Скорость превращения NO_2 в NO под воздействием кванта света зависит от коэффициента J . Оба коэффициента определяли экспериментальным путем.

Для выполнения прогноза уровня загрязнения воздушной среды указанными видами загрязнителей решаются уравнения

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[NO]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO]}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial[NO]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial[NO]}{\partial y}) + \\ & + Q_{NO} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[NO_2]}{\partial t} + \frac{\partial u[NO_2]}{\partial x} + \frac{\partial v[NO_2]}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial[NO_2]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial[NO_2]}{\partial y}) + \\ & + Q_{NO_2} \delta(x-x_0) \delta(y-y_0); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[O_3]}{\partial t} + \frac{\partial u[O_3]}{\partial x} + \frac{\partial v[O_3]}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial[O_3]}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial[O_3]}{\partial y}), \end{aligned} \quad (5)$$

где Q_{NO} и Q_{NO_2} – интенсивность выброса NO и NO_2 автотранспортом соответственно; 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_x рассчитывается по формуле $\mu_x = 0,11 \cdot y$, где y – высота над уровнем Земли; $\mu_y = (0,1-1) \cdot U$, где U – скорость ветра. Уравнения переноса для конкретного загрязняющего вещества записывали в форме, которая принята за рубежом [6, 9].

В расчетах химических превращений принято во внимание то, что выброс NO_2 составляет величину порядка 5% от выброса всех оксидов азота, а остальная часть, порядка 95%, это выброс NO . Скорость химических превращений принимаем равной: $J = 0,0045 \text{ s}^{-1}$; $k_1 = 0,00039 \text{ ppb}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [6, 9]. Поскольку размерность коэффициента k_1 приведена в несистемных единицах концентрации, то в разработанной подпрограмме расчета осуществляется переход от $\text{ppb}^{-1} \text{ s}^{-1}$ к г/м^3 и обратно. Процесс химической трансформации рассчитывается на основе зависимостей [9]

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} &= -k_1[NO][O_3] + J[NO_2]; \\ \frac{d[NO_2]}{dt} &= k_1[NO][O_3] - J[NO_2]; \\ \frac{d[O_3]}{dt} &= -k_1[NO][O_3] + J[NO_2]. \end{aligned}$$

Для численного интегрирования уравнений гидродинамики используются неявные разностные схемы. Разностные уравнения для расчета завихренности на каждом шаге расщепления имеют вид:

- на первом шаге

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

- на втором шаге

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

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, разработанной А.А. Самарским. В этом случае, разностные уравнения имеют вид:

- на первом шаге

$$\frac{\psi_{i,j}^{n+\frac{1}{4}} - \psi_{i,j}^n}{\Delta t} = \frac{-}{2};$$

- 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

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

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

Численное интегрирование уравнений переноса смеси (3–5) проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления. Если обозначить концентрацию любого из загрязнителей NO, NO_2 или O_3 буквой C , то разностная схема записывается аналогично для каждого из представленных уравнений.

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 аппроксимируют 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

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

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

где $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-, M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$ – условные обозначения разностных операторов. С учетом приведенных выше обозначений, разностный аналог уравнения переноса записывается как

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

В приведенных 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“.

На основе построенной численной модели разработан пакет программ на языке Фортран.

Разработанная численная модель при расположении зданий и автотрассы по схеме „уличный каньон“ была применена для практического расчета концентрации NO_2 на улице при выбросе оксида азота NO_x от автомагистрали (четырёхрядное движение), которая в расчетной схеме представлена четырьмя точечными источниками (рис. 2).

Расчет выполнялся при следующих данных: высота первого – 45 м, длина – 20 м; высота второго – 55 м, длина – 20 м; на высоте $h=10$ м скорость ветра – 5 м/с; коэффициенты атмосферной диффузии $\mu_x = \mu_y = 2 \text{ м}^2/\text{с}$; размеры расчетной области: длина – 125 м (по координате x), высота – 84 м (по координате y); четыре ис-

точника выброса NO_x . Автомагістраль розположена не симметрично по отношению к зданиям и находится ближе к левому зданию.

В качестве начального условия принималось, что фоновая концентрация NO и NO_2 в расчетной области равна нулю, а концентрация O_3 принята равной $0,16 \text{ мг/м}^3$.

Результаты расчета концентрации диоксида азота в „уличном каньоне“ для различных моментов времени представлены на рис. 3–5, где значение концентрации представлено в размерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени. Вывод на печать чисел осуществлен по формату „целое число“, т.е. дробная часть числа не выдается на печать. Такой подход эффективен при проведении серийных расчетов, когда осуществляется „перебор“ различных вариантов с целью выбора оптимального для конкретной ситуации. Однако, по требованию пользователя, разработанный код может осуществлять 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.

На рис. 3–5 хорошо видно, как с течением времени формируется сложная зона загрязнения, вызванная взаимодействием источников поступления оксидов азота и зданий. На рис. 3 представлена зона загрязнения в момент времени $t = 60 \text{ с}$. Ее высота сопоставима с высотой правого здания. На момент времени $t = 80 \text{ с}$ шлейф выбросов прижимается ветром к правому зданию, в результате чего на его наветренной стороне формируется зона загрязнения по всей высоте здания, которая переваливает на подветренную сторону. На момент времени $t = 180 \text{ с}$ обе стороны здания полностью оказываются в зоне загрязнения. Создается риск поступления опасного загрязнителя внутрь помещений здания.

На рис.6 показано распределение концентрации NO_2 на высоте 4 и 8 м поперек „уличного каньона“. Данный график позволяет определить подзону с повышенным значением концентрации загрязнителя.

Приведенные графики позволяют определить участок с повышенным значением содержания загрязнителя поперек зоны влияния автомагистрали. Так, индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), т.е. кратность превышения предельно допустимых концентраций (ПДК), диоксидом азота достигает 1 на участке, начиная, примерно, с 53–65 метров от осевой линии автострады. Максимальное значение концентрации и соответственно ИЗА наблюдается на расстоянии 75 м от дороги на высоте 4 м. На расстоянии 90 м ИЗА на высотах 4 и 8 м, практически, одинаков и составляет, примерно 1,8.

Разработанная методика позволяет оперативно прогнозировать уровни загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта при расположении зданий и автомагистрали по типу „уличный каньон“ с учетом химических превращений загрязняющих веществ. Выполненные расчеты, с использованием разработанной численной модели, выявили наличие в зоне городских автомагистралей участков застройки со значительным превышением ПДК и среднегодовых концентраций оксидов

азота. Следует отметить, что выполнение необходимых расчетов занимает несколько минут компьютерного времени.

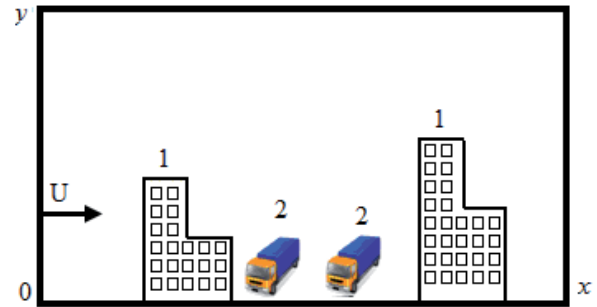


Рис. 2. Схема расчетной области: 1 – здания; 2 – автомагистраль

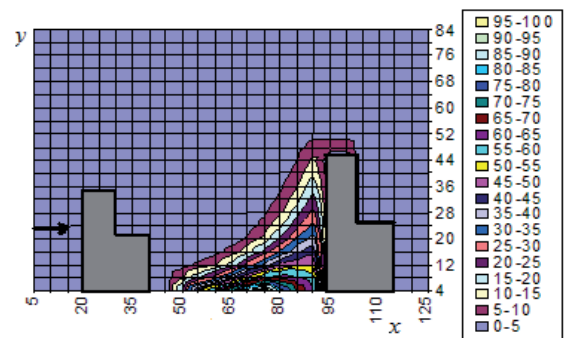


Рис. 3. Поле концентрации диоксида азота – NO_2 : $t = 60 \text{ с}$, $C_{max} = 0,0573 \text{ мг/м}^3$

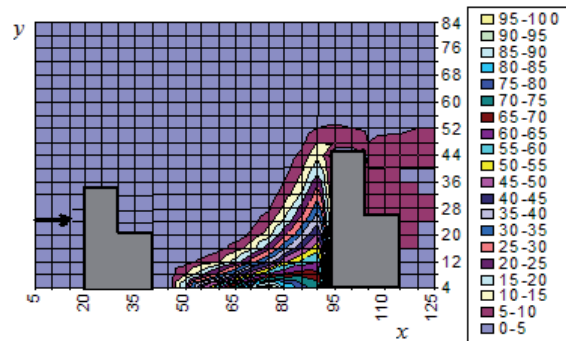


Рис. 4. Поле концентрации диоксида азота – NO_2 : $t = 80 \text{ с}$, $C_{max} = 0,0865 \text{ мг/м}^3$

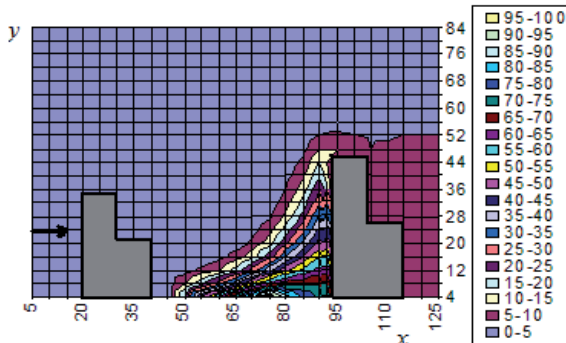


Рис. 5. Поле концентрации диоксида азота – NO_2 : $t = 180 \text{ с}$, $C_{max} = 0,1054 \text{ мг/м}^3$

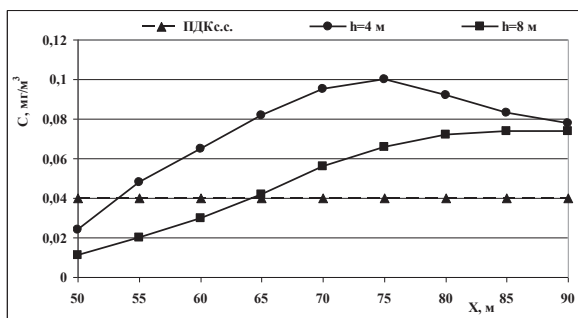


Рис. 6. Изменение концентрации NO₂ на высотах 4 и 8 м в сравнении с ПДК_{сс}, t = 180 с, C_{max} = 0,1054 мг/м³

Выводы и перспективы развития направления. В результате выполнения исследований получены следующие результаты:

- установлены закономерности рассеивания и химических превращений загрязняющих веществ, поступающих от автомагистрали в условиях „уличного каньона“;
- созданы математические модели, позволяющие оперативно характеризовать процесс переноса загрязнителей в зоне влияния городской автомагистрали;
- разработана методика оценки уровней загрязнения атмосферного воздуха на разных расстояниях от автомагистрали, позволяющая учитывать специфику химических превращений загрязняющих веществ в воздухе и влияние структуры жилой застройки на их рассеивание.

Разработанные модели позволяют повысить качество инженерных расчетов рассеивания загрязнителей вблизи автомагистралей при оценках уровня экологической безопасности городской атмосферы.

Результаты исследований рекомендуется применять при разработке генеральных планов развития городов для планирования автомагистралей в новых районах городов или при реконструкции старых микрорайонов. Установленные закономерности распространения загрязняющих веществ на разных удалениях от автомагистрали необходимо использовать для разработки и внедрения природоохранных мероприятий.

Полученные результаты формируют научно-методическую основу для создания трехмерной численной модели прогноза загрязнения атмосферного воздуха в „уличном каньоне“.

Список литературы / References

1. Kim, J.J., Smorodinsky, S., Lipsett M., Singer, B.C., Hodgson, A.T. and Ostro, B., 2004. Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay children's respiratory study. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 170 (5), pp. 520–526.

2. Чуваев П.И. Влияние автомобильного транспорта на навколишнє середовище / П.И. Чуваев // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ – 2013. – № 27. – С. 380–383.

Chuvaev, P.I., 2013. Influence of motor transport on environment, *Visnyk Natsionalnoho Transportnoho Universitetu*, 27, pp. 380–383.

3. Жуков М.Н. Метод підвищення детальності просторового розподілу забруднення (на прикладі Київської аг-

ломерації) / М.Н. Жуков, І.Р. Стахів // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – №1. – С. 113–118.

Zhukov, M.N., Stakhiv, I.R., 2014. The method of detailization of pollution spatial distribution (on the example of Kiev metropolitan area), *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, pp. 113–118.

4. Sider, T., Hatzopoulou, M., Eluru, N., Goulet-Langlois, G. and Manaugh, K., 2015. Smog and socio-economics: An evaluation of equity in traffic-related air pollution generation and exposure. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Vol. 42, pp. 870–887.

5. Beckerman, B., Jerrett, M., Brook, J.R., Verma, D.K., Arain, M.A. and Finkelstein, M., 2008. Correlation of nitrogen dioxide with other traffic pollutants near a major expressway, *Atmospheric Environment*, 42, pp. 275–290.

6. Kessler, Ch., Niederau, A. and Scholz, W., 2006. Estimation of NO₂/NO_x relations of traffic emissions in Baden-Wurttemberg from 1995 to 2005. In: *2 conf. Environment Transport, incl. 15th conf. Transport and Pollution*. Reims, France, 12–14 June, no. 107, Vol. 2, pp. 101–105.

7. Abo-Qudais, S. and Abu Qdais, H., 2005. Performance evaluation of vehicles emissions prediction models. *Clean Technologies and Environmental Policy*, no. 7, pp. 279–284.

8. Hatzopoulou, M., and Miller, E. J., 2010. Linking an activity-based travel demand model with traffic emission and dispersion models: Transport's contribution to air pollution in Toronto. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(6), pp. 315–325.

9. Denby, Br., Douros, I. and Fragkou, L., 2011. Modelling of Nitrogen Dioxide (NO₂) for air quality assessment and planning relevant to the European Air Quality Directive. *ETC/ACM Technical Paper*, 15, pp. 167–174.

10. Sathe Yogesh, V., 2004. Air quality modeling in street canyons of Kolhapur City, Maharashtra, India, *Universal J. of Environmental Research and Technology*, no. 2, vol. 2, pp. 97–105.

Мета. Розробка методики оцінки забруднення атмосферного повітря в зоні впливу міських автомагистралей, що базується на рівняннях відривних течій нев'язкої рідини, яка враховує специфіку житлової забудови, а також закономірності хімічних перетворень забруднюючих речовин.

Методика. Прогноз рівня забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту на вулицях міста ґрунтується на спільному рішенні гідродинамічної задачі з визначення поля швидкості вітрового потоку в зоні міської автомагистралі та завдання з перенесення домішок в атмосфері. Для визначення поля швидкості вітрового потоку використовували метод відривних вихрових течій ідеальної нестисливої рідини. Закономірності перенесення домішок в атмосфері встановлювали за допомогою рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки та її хімічної трансформації в атмосфері. Прогноз концентрацій забруднюючих речовин проводився шляхом чисельного моделювання на прямокутній різнищевій сітці з використанням методу маркування розрахункової області на основі попеременно-трикутної різнищевій схеми.

Результати. Розроблена методика дозволяє оперативно прогнозувати рівні забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту при розташуванні будівель і автомагістралі за типом „вуличний каньйон“ з урахуванням хімічних перетворень забруднюючих речовин. Застосування розробленої чисельної моделі дозволило на практиці встановити динаміку вмісту діоксиду азоту в повітрі біля будинків, прилеглих до автомагістралі. Проведено порівняльний аналіз зміни концентрації діоксиду азоту відносно його гранично допустимої концентрації в атмосфері та середньорічних значень.

Наукова новизна. Розроблена методика оцінки рівнів забруднення атмосферного повітря на різних відстанях від автомагістралі, що дозволяє враховувати специфіку хімічних перетворень забруднюючих речовин у повітрі та вплив структури житлової забудови на їх розсіювання.

Практична значимість. Розроблена прогнозна методика може бути використана при плануванні автомагістралей у нових районах міст або при реконструкції старих для проведення серій розрахунків, що вимагають перебору різних варіантів розташування будівель і автомагістралей за певних метеорологічних умов. Отримані закономірності поширення забруднюючих речовин на різних відстанях від автомагістралі рекомендується застосовувати для своєчасного впровадження природоохоронних заходів.

Ключові слова: *автотранспорт, магістраль, забруднення повітря, розсіювання викидів*

Purpose. The development of the methodology for atmospheric air pollution assessment in the zone affected by city highways, which is based on the equation of detached flow of inviscid fluid and considers the dwellings zone peculiarities as well as the natural laws of chemical transformations of air pollutants.

Methodology. The predicted level of atmospheric air pollution in the city area located near highways and affected by automotive pollutants is reasoned by the joint solution of hydrodynamic equation of field of velocities for wind flow

estimation in the highway area and the problem of admixture transfer in the atmosphere. To estimate the field of velocities for wind flow the method of incompressible frictionless vortex-type flow was applied. The natural laws of admixture transfer in the atmosphere were established by means of convection and diffusive transfer of admixture and its chemical transformation in the atmosphere. The predicted concentration of pollutants was estimated by means of numerical simulation on computational straight-line graticube using the method of labeling of rated operating conditions based on the alternating triangular difference scheme.

Findings. The developed methodology enables efficient prediction of atmospheric air pollution levels by automotive pollutants in case of buildings and highway arrangement of street canyon type and considering the chemical transformations of pollutants. The application of the developed numerical model enabled the establishment of the nitrogen dioxide concentrations dynamics in the air near the buildings adjacent to the highway. The comparative analysis for nitrogen dioxide concentrations changes relative to its maximum permissible concentration in the atmosphere and its annual average was carried out.

Originality. The methodology for atmospheric air pollution levels assessment at the different distances from a highway was developed. It allows considering the natural laws of chemical transformations of air pollutants as well as the effect of dwellings zone peculiarities on their dispersion.

Practical value. The developed prognostic methodology can be used for the planning of highways in new city districts as well as for the calculations of old highways reconstruction requiring consideration of different types of buildings and highways arrangement under the definite meteorological conditions. The obtained laws of pollutants dispersion at the different distances from a highway should be considered for the timely adoption of the nature-conservative measures.

Keywords: *motor transport, highway, air pollution, emission dispersion*

Рекомендовано к публікації докт. біол. наук А.І. Горовою. Дата надходження рукопису 15.02.15.