

**Т.И. Русакова***Днепропетровский национальный университет имени О.Гончара***ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА НА УЧАСТКЕ ПРОСПЕКТА ПРАВДЫ ГОРОДА ДНЕПРОПЕТРОВСКА**

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** С середины XX века процессы урбанизации приняли очень быстрые темпы, в среднем, 80 – 85 % населения земного шара проживают в городах, где транспорт, особенно автомобильный, представляет собой с одной стороны ключевое звено функционирования любого города, а с другой, – источник загрязнения окружающей среды. В связи с этим, в современных городах на фоне загрязнения атмосферного воздуха выбросами от промышленных предприятий, доля выбросов мобильных видов транспорта, в зависимости от категории и уровня промышленного потенциала, изменяется в пределах 20-80%.

Транспорт, как важнейший компонент общественного и экономического развития любых населенных пунктов, потребляет значительное количество природных ресурсов (нефть, газ, металл и др.), и таким образом оказывает прямое и косвенное влияние на окружающую среду в виде выбросов, отходов, загрязняющих все компоненты природной подсистемы города, в том числе создающий экологическую опасность для человека.

Вместе с тем, виды транспортных услуг и их объемы непрерывно растут, увеличиваются грузо- и пассажиропотоки. На смену устаревшим видам транспорта приходят новые, которые требуют скоростных и хорошо оборудованных транспортных магистралей.

Если учесть, что в группе мобильных видов транспорта, автомобильный достигает 85 – 90 %, практически каждый житель города имеет личный автомобиль, кроме этого около 50 % добываемой нефти потребляет именно эта группа, рост которой опережает темпы роста населения. Актуальность данной задачи определяется тем, что выбросы от автотранспорта в крупных городах существенно влияют на

загрязнение всех компонентов окружающей среды. Аэрозольные и пылевые частицы осаждаются на поверхности растений, поглощаются верхними слоями почвы, вымываются осадками в виде дождя, снега, талыми и сливными потоками. Кроме этого большое количество токсических веществ, поступающих в атмосферный воздух, распространяется на уровне органов дыхания человека, вызывая различные заболевания.

Поэтому, изучение закономерностей распределения загрязняющих веществ в районах автомагистралей, вдоль которых располагаются жилые дома, является одной из актуальных задач обеспечения экологической безопасности города.

**Анализ существующих решений.** Для решения прогнозных задач данного класса используются эмпирические, аналитические и численные модели.

*Эмпирические модели* представляют собой простые алгебраические соотношения между искомой величиной и рядом параметров, влияющих на процесс загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта. Данные модели получены путем обработки результатов измерений, проведенных непосредственно на улицах возле автомагистралей [1, 3, 4, 9]. За рубежом эти модели используются для решения прогнозных задач в масштабе «local». В России и в Украине нормативная эмпирическая модель применяется для прогноза в масштабе «urban».

Очевидными достоинствами эмпирических моделей являются: простота расчетных зависимостей; минимальный объем исходной информации, необходимой для реализации моделей; возможность применения без использования компьютера.

Однако следует отметить, что все эмпирические модели не учитывают: процесс атмосферной диффузии; неравномерность поля скорости ветрового потока на улице; влияние зданий на формирование зоны загрязнения на улице; модели могут быть разработаны только для одного вида загрязнения (например, только СО).

*Аналитические модели* основаны на аналитическом решении уравнения переноса примеси [2, 12, 14]. Эти модели используются для решения данного класса задач как в масштабе «local», так и в масштабе «urban».

Аналитические модели обладают следующими достоинствами, а именно учитывают: скорость ветра; коэффициент атмосферной диффузии; состояние атмосферы; интенсивность эмиссии загрязняющего вещества.

Оценка качества атмосферного воздуха на базе моделей данной группы не требует больших затрат компьютерного времени для получения оценочных данных, для формирования вида расчетной области и на построение расчетной сетки. Следует отметить невысокую стоимость расчета, что крайне важно при проведении повариантных расчетов.

Аналитические модели имеют также существенные ограничения: в них не учитывается неравномерное поле скорости ветра на улице; нет учета формы зданий и их взаимного размещения; расчет зон загрязнения проводится по заданному значению скорости ветра.

За рубежом модели данного класса используются при решении экологических задач в рамках разработки регуляторной политики.

*Численные модели.* Модели данной группы – это самый мощный теоретический инструмент для решения сложных задач по оценке уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта на улицах городов. Данные модели делятся на две подгруппы [7,11,13,15]:

1. Модели, основанные на численном решении уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси в атмосфере, – кинематические модели.

2. Модели, основанные на численном интегрировании уравнений гидродинамики и уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси в атмосфере, – модели CWE (Computational Wind Engineering).

Анализ научных публикаций, посвященных разработке численных моделей, позволит выделить следующие их достоинства: возможность моделирования с учетом комплекса наиболее важных физических факторов (неравномерности распределения скорости ветрового потока и атмосферной диффузии, учета зданий, режима эмиссии вредных веществ); возможность получения прогнозных данных в любой интересующей точке; возможность представления результатов прогнозирования в виде, удобном для анализа.

Однако численные модели обладают рядом недостатков: сложность построения в дискретном виде расчетной области; трудность построения алгоритма решения задачи в областях сложной геометрической формы; большие временные затраты на проведение вычислительного эксперимента (порядка 3 и более суток); необходимость применения мощных компьютеров, не всегда доступных широкому пользователю.

**Цель и задачи.** Целью данной работы является разработка прогнозной модели на базе уравнений отрывных течений невязкой жидкости и ее применение для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на участке проспекта Правды города Днепропетровска.

**Математическая модель.** В данной работе применяем модель отрывных течений невязкой жидкости [7, 11], базовыми уравнениями которой является уравнение переноса завихренности (1) и уравнение Пуассона (2) для расчета функции тока [7, 11]:

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

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

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

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

Угловые точки зданий являются местами отрыва потока, откуда сходят вихри, чтобы обеспечить конечность скоростей в острых краях. Возникает необходимость решения задачи о расчете интенсивности этих вихрей.

Для данных уравнений гидродинамики осуществляем постановку следующих граничных условий. Для уравнения Пуассона на поверхности препятствий ставим граничное условие «непротекания» [7, 11]:  $\psi=0$ .

На границе входа воздушного потока в расчетную область задаем скорость воздушного потока  $u$  и соответствующее значение функции тока  $\psi$  и завихренности  $\omega$ :  $\psi|_{\text{вход}} = \psi(y)$ ,  $\omega|_{\text{вход}} = \omega(y)$ .

На верхней границе расчетной области также ставим условие «непротекания»:  $\psi = \text{const}$ .

На границе выхода воздушного потока из расчетной области ставим «мягкие» граничные условия, необходимые для замыкания разностных уравнений [1].

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

Для расчета зон загрязнения на улицах при различных метеоусловиях и параметрах выброса загрязняющих веществ используем уравнение массопереноса [5, 7, 11, 13]

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

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества;  $u, v$  – компоненты вектора скорости ветра;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника выброса;  $\sigma$  – коэффициент, учитывающий химический распад загрязнителя;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [7, 11]. Для формирования вида расчетной области, положения зданий, их формы, используем метод маркирования расчетной области [7, 11]. Расчет выполняем на прямоугольной разностной сетке. Используя данный метод, можно формировать любую форму зданий на улицах и выбирать их взаимное расположение.

**Метод решения.** Так для интегрирования уравнения переноса завихренности применяем попеременно-треугольную разностную схему [5, 8].

Значение завихренности на каждом расчетном шаге рассчитываем по формуле «бегущего» счета. Значение функции тока рассчитываем с помощью разностной схемы суммарной аппроксимации [5, 8]. Численное интегрирование уравнения переноса примеси (3) проводим с помощью неявной разностной схемы расщепления [5, 8].

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

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

Расщепляем разностное уравнение на четыре разностных уравнения так, чтобы на каждом шаге учитывалось лишь одно направление переноса возмущений, определяемое знаком при конвективной производной.

В полученных разностных уравнениях используем значение интенсивности  $\bar{q}_i = \frac{q_i}{\Delta x \Delta y}$  и значение функции  $\delta_i$ , которое

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

**Практическая реализация модели.**

На основе рассмотренных разностных схем построена численная модель распространения выбросов автотранспорта на улицах. Данная модель позволяет учитывать следующие факторы: наличие зданий и их взаимное расположение в микрорайоне города; скорость и направление ветра; атмосферную диффузию; местоположение и интенсивность выброса загрязняющего вещества.

Разработанная численная модель была использована для моделирования уровня загрязнения воздушной среды на участке проспекта Правды – одной из наиболее интенсивных автомагистралей города Днепропетровска (рис. 1).

Рассматриваемый участок проспекта Правды граничит с магистралью, идущей от моста через реку Днепр, и с виадуком, который перпендикулярен проспекту Правды. При решении данной задачи выбросы автотранспорта на этих участках не учитывались. Это делалось для того, чтобы проанализировать «вклад» рассматриваемого участка проспекта Правды на формирование зоны загрязнения, так как это наиболее интенсивная автомагистраль в данном районе города Днепропетровска.

Моделирование проводилось при следующих исходных данных: размеры расчетной области 500м×420м; скорость ветра 4,5 м/с; значения коэффициентов турбулентной диффузии по всем направлениям 2 м<sup>2</sup>/с.



Рис. 1. Участок проспекта Правды города Днепропетровска

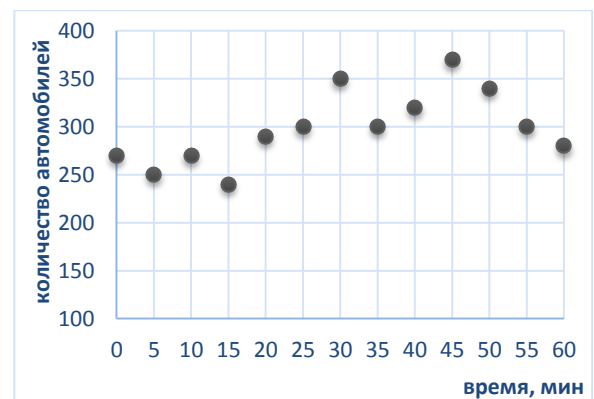


Рис. 2. Изменение интенсивности движения автотранспорта в течение часа на рассматриваемом участке проспекта Правды города Днепропетровска

Подсчитывалось количество автомобилей за 1 минуту через каждые пять минут в течение одного часа с 8<sup>00</sup> до 9<sup>00</sup>. Результаты статистических измерений показаны на рис. 2. Затем рассчитали среднюю интенсивность движения автотранспорта на рассматриваемом участке проспекта Правды (рис. 3), которая составила в среднем 300 ав/мин с учетом того, что автомагистраль имеет 4 ряда движения.

Согласно литературным источникам [6, 10, 16] полагали, что средний выброс СО от одного автомобиля составляет порядка 0,058 г/с, а скорость движения принимали равной 40 км/ч.

На следующем этапе получили интенсивность выброса от автомагистрали в предположении, что это линейный источник выброса.

Полученные данные рис. 2 позволили выполнить расчет интенсивности выброса СО на 1 м трасы (рис. 3).

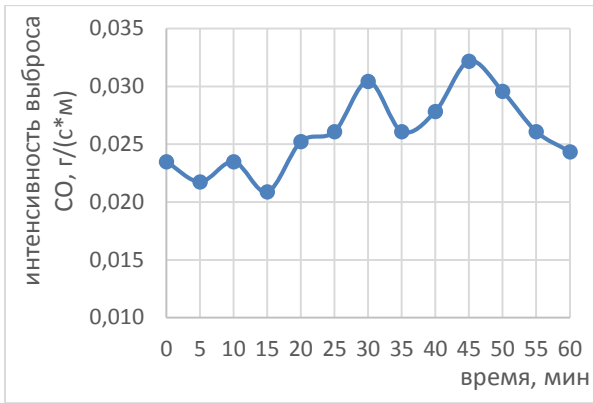


Рис. 3. Изменение интенсивности выброса СО в течение часа на рассматриваемом участке проспекта Правды города Днепрпетровска

Расчет выполнили по следующим зависимостям [10]:

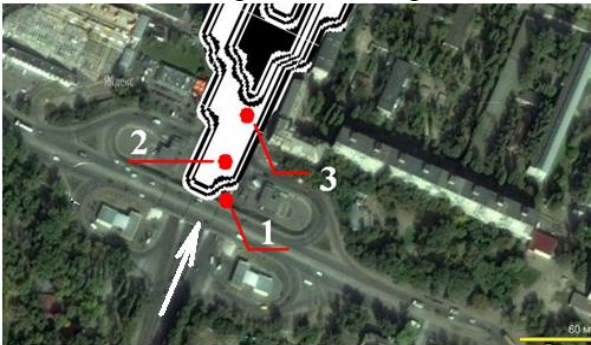
1. Относительное количество автомобилей  $K_{авт}$  на 1 м автомагистрали:

$$K_{авт} = \frac{\text{кол.авт/ч}}{\text{скорость(м/ч)}} = \frac{300 \cdot 60 \text{ авт/ч}}{40 \cdot 1000 \text{ м/ч}} = 0,45 \text{ авт/м}$$

2. Интенсивность выброса  $q_{авт}$  СО на 1 м, согласно тому, что выброс СО от одного автомобиля составляет  $q_1 = 0,058 \text{ г/с}$ :

$$q_{авт} = K_{авт} \cdot q_1 = 0,45 \text{ авт/м} \cdot 0,058 \text{ г/с} = 0,026 \text{ г/(с} \cdot \text{м)}$$

Согласно полученным данным по интенсивности выброса СО, произвели численный расчет на основе разработанной численной модели на базе отрывных течений невязкой жидкости. Результаты этого расчета (изолинии концентрации СО) показаны на рис. 4. Хорошо видно, что зона загрязнения представляет собой «язык», вытянутый вдоль автомагистрали. Стрелкой показано направление ветра.



1 –  $C=0,001 \text{ г/м}^3$ ; 2 –  $C=0,008 \text{ г/м}^3$ ;  
3 –  $C=0,011 \text{ г/м}^3$

Рис. 4 – Зона загрязнения на проспекте Правды

Как видно из рис. 4, минимальное значение концентрации СО на рассматриваемом участке пр. Правды составляет  $C=0,001 \text{ г/м}^3$ . Концентрация СО увеличивается вдоль автомагистрали по направлению ветрового потока в силу взаимовлияния источников выброса, которые располагаются в численной модели на данном участке. Видно, что примерно на середине рассматриваемого участка проспекта Правды концентрация СО на автомагистрали превышает ПДК= $0,003 \text{ г/м}^3$ . Таким образом, на магистрали формируется зона интенсивного загрязнения атмосферного воздуха.

**Выводы.** Расчетами было показано, что на основе разработанной численной модели на базе уравнений отрывных течений невязкой жидкости и уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси можно оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха вдоль рассматриваемой автомагистрали и выявить участки, где наблюдается превышение ПДК по данному загрязнителю (в данном случае по СО) и участки благоприятные для населения при заданной интенсивности движения и конкретных метеорологических условиях.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
2. Бруцкий Е.В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – К. : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
3. Дьяконов А.Б. Экономическая безопасность транспортных потоков / А.Б. Дьяконов.– М. : Транспорт, 1989. – 160 с.
4. Крушель Е.Г. Алгоритм оценки рассеивания вредных веществ в атмосфере от транспортного потока на автомагистрали города Камышина / Е. Г. Крушель, А.Э. Панфилов, И. В. Степанченко // Изв. ВолГТУ. – 2010. – Вип. 6, №. 4.– С. 29-32.
5. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
6. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения свободных расчетов загрязнения атмосферы городов. Утв.

- приказом Госкомэкологии России № 66 от 16 февраля 1999 г. – М., 1999.
7. 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.
  8. Самарский А.А. Математическое моделирование / А.А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит, 2001. – 320 с.
  9. Солошич І.О. Дослідження забруднення повітря транспортними потоками центральної частини м. Банська-Бистриця (Словацька респ.) / І.О. Солошич, В.В. Підліснюк // Екологічна безпека. – 2009. – Вип. 4, № 8. – С. 43-48.
  10. Уорк К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер – М. : Мир, 1980. – 539 с.
  11. 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.
  12. Шаталов А.А. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа / А.А. Шаталов, М.В. Лисанов // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 9. – С. 46-52.
  13. Belayev N.N. Computer simulation of the pollutant dispersion among buildings / N.N. Belayev, M.I. Kazakevitch, V.K. Khrutch // Wind Engineering into 21st Century: Proc. of the Tenth Intern. Conf. on Wind Engineering, Copenhagen (Denmark), 1999. – P. 117-120.
  14. Hanna S. Air Quality Modelling over Short Distances / S. Hanna // College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling: 16 May-3 June. – 1994. – № SMR/760-2. – P. 712-743.
  15. Murakami S. Comparison of “k-ε” Model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cubic model / S. Murakami, A. Mochida, H. Yoshihiko // 8th Intern. Conf. on Wind Engineering, Western Ontario, July 8-11. – 1991. – № 12. – P. 37-42.
  16. URL : [http://www.gosthelp.ru/text/Methodika\\_opredeleniya\\_vybros.html](http://www.gosthelp.ru/text/Methodika_opredeleniya_vybros.html).

УДК: 504:621.317.08

**Юрченко В.А.,**

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

**Мельникова О.Г.**

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНОЙ НАГРУЗКИ, СОЗДАВАЕМОЙ АЗС НА ПРИЛЕГАЮЩИЕ ПОЧВЫ**

Автомобильно-дорожный комплекс создает интенсивную ингредиентную нагрузку на прилегающие почвенные экосистемы. Причем, наибольшие превышения ПДК в таких почвах отмечено по загрязнению нефтепродуктами (НП) [1]. АЗС, в отличие от автодорог являются источником выброса в окружающую среду большого количества горюче смазочных материалов (ГСМ), утечки которых носят неравномерный по площади и нерегулярный по времени характер [1, 2]. Поступление НП в почвенную среду приводит к экологически опасному изменению химиче-

ского состава почвы, гумусового горизонта, физиологических и биохимических свойств и структуры почвы [2].

Цель работы – определение экологических последствий нагрузки, создаваемой АЗС на прилегающие почвенные экосистемы, на основании измерения химических, физиологических и биохимических характеристик почвы.

Объектом исследования являлись почвы, прилегающие к АЗС. Исследуемые АЗС расположены вдоль автомобильной дороги второй категории Р-46 Харьков – Ахтырка: АЗС №1 с пропускной способностью 1108 автомобилей в сутки, АЗС №2 с