

ISBN 978-83-959742-0-5

# Conference proceedings Transport Problems 2020

XII INTERNATIONAL  
SCIENTIFIC  
CONFERENCE

IX INTERNATIONAL  
SYMPOSIUM OF YOUNG  
RESEARCHERS

30.11-02.12 2020  
Katowice - Silesia  
(online)



Politechnika  
Śląska



Wydział  
Transportu  
i Inżynierii  
Lotniczej



UNDER THE HONORARY PATRONAGE OF MAYOR OF  
KATOWICE CITY

AND RECTOR OF SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Silesian University of Technology  
Faculty of Transport and Aviation Engineering

# Transport Problems 2020

Proceedings

XII International Scientific Conference

IX International Symposium of Young Researchers

UNDER THE HONORARY PATRONAGE OF MAYOR OF KATOWICE CITY  
AND RECTOR OF SILESIA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Silesian University  
of Technology

ISBN 978-83-959742-0-5

Transport Problems  
International Scientific Journal

*editor-in-chief*  
**A. Sładkowski**  
*editorial board*

*H. Bąkowski, P. Czech, M. Cieśla, T. Haniszewski,  
M. Juzek, W. Kamiński, P. Marzec, G. Wojnar*

*CONFERENCE  
PROCEEDINGS*

*CONFERENCE  
PROGRAM*

*CONFERENCE  
PARTICIPANTS*

*CONFERENCE -  
TABLE OF  
PRESENTATIONS*

*CONFERENCE -  
TABLE OF  
CONTENTS*

*CONFERENCE -  
AUTHORS LIST*

**XII INTERNATIONAL CONFERENCE  
TRANSPORT PROBLEMS 2020**

**IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF YOUNG RESEARCHERS**

**TABLE OF CONTENTS**

No.	Author, title	Pages	
		Begin	End
1	Telman ALIEV, Tofiq BABAYEV, Tahir ALIZADA, Elnur ALIBAYLI, Heybatulla AHMEDOV <i>Technology for noise control of changes in the vibration state of the railroad track</i>	<a href="#">1</a>	7
2	Asen ASENOV, Velizara PENCHEVA <i>Methodology for expert evaluation of multimodal schemes for transportation of goods by waterway and land transport</i>	<a href="#">8</a>	19
3	Henryk BĄKOWSKI, Andrzej SOKOŁOWSKI, Łukasz ŁOMOZIK <i>Analysis of causes of damage to draw hooks used in freight car</i>	<a href="#">20</a>	30
4	Danijela BARIC, Matej PAVIC <i>Application of four-step travel demand model for planning sustainable transport of the city of Split</i>	<a href="#">31</a>	39
5	Saule BEKZHANOVA, Botakoz ISINA, Zhanar ALTAEVA, Gulzhan MURATBEKOVA <i>Synergy approach to creation of automated workplaces of railway transport specialists of the republic of Kazakhstan</i>	<a href="#">40</a>	49
6	Mykola BILIAIEV, Oleksandr PSHINKO, Tetiana RUSAKOVA, Viktoriia BILIAIEVA, Aleksander ŚLADKOWSKI <i>Computing model for simulation the pollution dispersion near the road with noise barriers</i>	<a href="#">50</a>	62
7	Miroslav BLATNICKÝ, Ján DIŽO, Dalibor BARTA, Paweł DROŹDZIEL <i>Creating of the assembly methodology of the compressor on a car with a pneumatic chassis</i>	<a href="#">63</a>	71
8	Yuriy BORONENKO, Rustam RAHIMOV <i>Experimental determination of vertical and lateral loads on the bogie side frame of a freight wagon</i>	<a href="#">72</a>	81
9	Daniel BUCZKOWSKI, Grzegorz NOWAK <i>Modelling the shock absorber piston valve using 2-way fluid-structure interaction</i>	<a href="#">82</a>	94
10	Artur BUDZYŃSKI <i>Use dependencies between freight prices and economic factor as a solution in improve efficiency work in road transport</i>	<a href="#">95</a>	102

**Keywords:** автомобильный транспорт, концентрация загрязнения, защитные экраны

**Mykola BILIAIEV, Oleksandr PSHINKO**

Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan  
Lazaryan, 2, Dnipro, 49010, Ukraine

**Tetiana RUSAKOVA\*, Viktoriia BILIAIEVA**

Oles Honchar Dnipro National University  
Haharin av., 72, Dnipro, 49010, Ukraine

**Aleksander ŚLADKOWSKI**

Silesian University of Technology  
Kraśiński, 8, 40-019, Katowice, Poland

\*Corresponding author. E-mail: rusakovati1977@gmail.com

## COMPUTING MODEL FOR SIMULATION THE POLLUTION DISPERSION NEAR THE ROAD WITH NOISE BARRIERS

**Summary.** In this study, a numerical model is proposed for calculating pollution zones near the road, taking into account the geometry of the vehicle, meteorological conditions, the location of the screens, and their height, the chemical transformation of nitrogen oxides in the atmospheric air and the terrain. Based on this numerical model, a software package has been developed that allows computational experiments and does not require large expenditures of computer time. Based on the results obtained, an assessment was made of the effectiveness of the use of screens to reduce the level of air pollution near highways. It has been established that the use of screens reduces the level of pollution behind the road by about 20-26%.

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСПЕРСИИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВБЛИЗИ ДОРОГИ С ШУМОЗАЩИТНЫМИ ЭКРАНАМИ

**Аннотация.** В данном исследовании предложена численная модель для расчета зон загрязнения возле автодороги с учетом геометрии автомобиля, метеоусловий, местоположения экранов и их высоты, химической трансформации оксидов азота в атмосферном воздухе и рельефа местности. На основе данной численной модели разработан программный пакет, который позволяет проводить вычислительные эксперименты и не требует больших затрат компьютерного времени. На основе полученных результатов выполнена оценка по эффективности применения экранов для снижения уровня загрязнения воздушной среды возле автодорог. Установлено, что использование экранов снижает уровень загрязнения за автодорогой порядка 20-26 %.

### 1. INTRODUCTION

Загрязнение атмосферного воздуха остается на сегодняшний день одной из наиболее серьезных экологических проблем всех крупных урбанизированных центров. Выбросы от автотранспорта в крупных городах существенно влияют на загрязнение всех компонентов окружающей среды. Пылевые и аэрозольные частицы осаждаются на поверхности растений, поглощаются верхними слоями почвы, вымываются осадками и сливными потоками. Большое

количество токсических веществ, которые поступают в атмосферный воздух, распространяется на уровне органов дыхания человека, вызывая различные заболевания. Вредные вещества распространяются как вдоль автодорог, так и в их окрестности, оказывая негативное воздействие как на водителей и пешеходов, так и на население, места проживания которых находятся вдоль автодорог. Состав и количество выбросов выхлопных газов зависит как от состояния двигателя и его технического уровня, так и от типа используемого топлива, но в каждом из этих случаев они содержат большое количество токсичных соединений – бензапирена, альдегидов, оксидов азота, диоксида серы, углерода, соединений свинца.

Анализ статистических данных загрязнения атмосферного воздуха показывает, что за последние 10 лет наблюдается тенденция увеличения выбросов от автотранспорта, поскольку увеличивается количество автотранспорта, а автодороги, парковки занимают более 40% территории города, уменьшая тем самым количество площадей санитарно-защитных зон. Согласно данным Главного управления статистики в Днепропетровской области, автомобильный парк г. Днепр постоянно возрастает, он представлен легковыми автомобилями на 87%, грузовыми – 13% и автобусами – 2%.

Оценка влияния автомобильных дорог на состояние атмосферного воздуха выполнена в работах [1–4]. Установлено, что формируются зоны, где концентрация отработанных газов превышает предельно-допустимые показатели. Значение концентрации вредных примесей в воздухе вдоль автодорог зависит от особенностей организации движения по дорогам, характеристик транспортного потока и параметров окружающей среды, а также от расположения зданий и сооружений, наличия зеленых насаждений. В местах с низкой пропускной способностью, возле остановок общественного транспорта концентрация загрязняющих веществ достигает пиковых значений, организация непрерывного движения транспортных средств приводит к уменьшению выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта.

Крайне важной задачей является минимизация уровня химического загрязнения вдоль автодорог. Одним из эффективных средств является применение экранов, которые позволяют изменить траекторию движения частиц загрязнения и снизить локально уровень химического загрязнения [5–7]. На эффективность работы экранов влияет ряд факторов: метеорологические условия (скорость и направление ветра), интенсивность эмиссии загрязняющих веществ, наличие локальных препятствий, т.е. при установке экранов важен учет конкретных местных условий. Также эффективность использования экранов в сравнении с зелеными насаждениями наступает с момента их установки независимо от периода года.

Прогнозирование уровня концентрации вредных веществ является необходимой составляющей на этапе проектирования новых автодорог или при реинжиниринге существующих, для обоснования изменения трафика движения автотранспорта.

За рубежом для решения этой задачи используется модель Гаусса и CFD модели [7-13]. Модель Гаусса является удобной и быстро считающей, но не может учитывать наличие препятствий, а именно экранов. CFD модели основываются на решении уравнения Навье-Стокса, могут считать любую конфигурацию, представляют собой самый мощный инструмент моделирования, но для реализации таких разработок требуются значительные затраты времени на получение результата. Время расчета может составлять несколько суток, поэтому очень важно иметь эффективные научно-обоснованные модели, которые позволяют быстро провести оценку выбора размеров экранов и их расположения.

Целью данной работы является разработка быстро считающей численной модели для расчета уровня загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта при наличии экранов.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассматривается автодорога общегородского значения с непрерывным четырехрядным движением, ширина одной полосы движения составляет 3,75 м, с одной из сторон дороги

предполагается размещение защитных экранов, поскольку там располагается жилая зона (рис. 1). Ставится задача расчета зоны загрязнения атмосферного воздуха при эмиссии загрязняющих веществ от автотранспорта ( $NO$ ,  $NO_2$ ), а также оценка влияния экранов различной высоты на уменьшение значения концентрации вредных веществ за экраном.

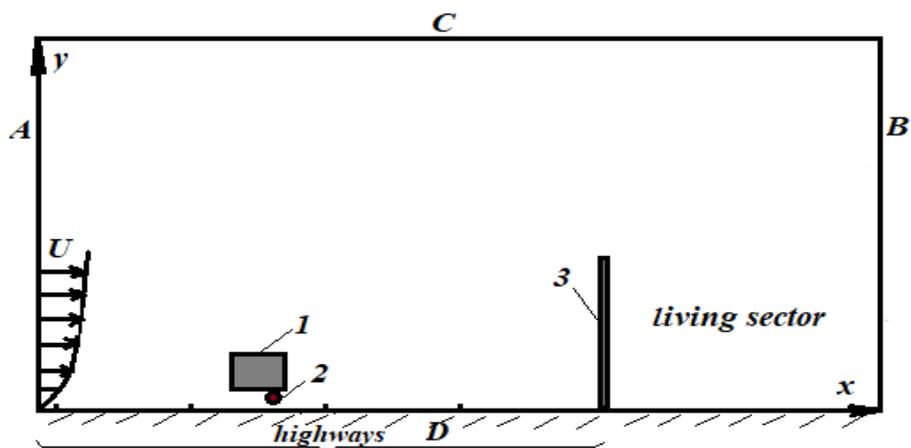


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – автотранспорт, 2 – источник эмиссии (выхлопная труба автомобиля), 3 – экран; A, B, C, D – границы расчетной области

Как известно, под действием солнечного света  $h_\nu$  ( $\lambda < \pm 430$  нм) диоксид азота распадается на оксид азота и атомарный кислород, который превращает кислород  $O_2$  в озон  $O_3$ .

Накапливаясь в нижних слоях атмосферы, эти вещества оказывают вредное воздействие на организм человека. Основными реакциями при этом являются реакции (1) – (3) [14–16]:



где  $J$  – параметр скорости реакции для процесса фотолиза в зависимости от количества ультрафиолетового излучения,  $k_1$  – параметр скорости реакции для  $NO$  [1/с].

В настоящей работе ограничимся рассмотрением процесса переноса возле автомагистрали окиси азота и двуокиси азота. Выбор только этих загрязняющих веществ связан также с тем, что для расчета химической трансформации выбросов в атмосфере необходимо знать скорости их химических реакций, которые определяются экспериментальным путем и изучались в работах [14–16]. Решение задачи о прогнозе загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта будет осуществляться в два этапа.

Так как рассматривается перенос веществ  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$  в атмосферном воздухе и учитывается, что на изменение концентрации этих веществ влияют: скорость воздушного потока, атмосферная диффузия, интенсивность выбросов, то для моделирования используется уравнение массопереноса [17]. Это уравнение показывает изменение концентрации  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$  в исследуемой области с течением времени. Поэтому, на первом этапе решения будет моделироваться процесс переноса указанных веществ в атмосферном воздухе на основе уравнений массопереноса (4) – (6):

$$\frac{\partial C_{NO}}{\partial t} + \frac{\partial(uC_{NO})}{\partial x} + \frac{\partial(vC_{NO})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C_{NO}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C_{NO}}{\partial y}) + \sum_{i=1}^n Q_{NO_i}(t)\delta(x-x_{0i}, y-y_{0i}), \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{NO_2}}{\partial t} + \frac{\partial(uC_{NO_2})}{\partial x} + \frac{\partial(vC_{NO_2})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C_{NO_2}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C_{NO_2}}{\partial y}) + \sum_{i=1}^n Q_{NO_2_i}(t)\delta(x-x_{0i}, y-y_{0i}), \quad (5)$$

$$\frac{\partial C_{O_3}}{\partial t} + \frac{\partial(uC_{O_3})}{\partial x} + \frac{\partial(vC_{O_3})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial C_{O_3}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial C_{O_3}}{\partial y}), \quad (6)$$

где  $C_{NO}(x, y, t)$ ,  $C_{NO_2}(x, y, t)$ ,  $C_{O_3}(x, y, t)$  – концентрация загрязняющих веществ  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ , [кг/м<sup>3</sup>];  $Q_{NO_i}$ ,  $Q_{NO_2_i}$  – интенсивность выброса  $NO$ ,  $NO_2$  от  $i$ -ого источника эмиссии (автотранспорта), кг/(с·м<sup>3</sup>);  $u$ ,  $v$  – компоненты вектора скорости ветра, [м/с];  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент турбулентной диффузии, [м<sup>2</sup>/с];  $x_{0i}, y_{0i}$  – координаты источников выброса загрязняющего вещества (автодороги), [м];  $\delta(x-x_{0i}, y-y_{0i})$  – дельта-функция Дирака, которая моделирует наличие выброса загрязнителя.

Значения коэффициентов диффузии рассчитываются по формулам:  $\mu_x = k_0 \cdot U$ ,  $k_0 = (0,1 \div 1)$  м в зависимости от степени устойчивости атмосферы,  $U$  – скорость

ветра, [м/с];  $\mu_y = k_1 \left( \frac{Y}{Y_1} \right)^m$ ,  $k_1 = (0,1 \div 0,2)$  м<sup>2</sup>/с в рамках высоты приземного слоя атмосферы [17–18],  $Y_1 = 10$  м,  $m \approx 1$ .

Дельта-функция равна нулю везде, кроме ячеек, где находится  $i$ -тый источник загрязнения. Эмиссия загрязняющих веществ от автотранспорта моделируется точечными источниками (автомобилями), заданной интенсивности  $Q_{NO_i}, Q_{NO_2_i}$ ,  $n$  – количество источников загрязнения.

$\sum_{i=1}^n Q_{NO_2_i}(t)\delta(x-x_{0i}, y-y_{0i})$  – означает, что учитывается действие всех источников загрязнения с конкретной интенсивностью загрязняющего вещества, с учетом принципа суперпозиции.

В дискретном виде дельта-функция Дирака «размазывается» по площади (объёму) разностной ячейки с сохранением суммарного количества загрязнения, т.е. интенсивность источника рассматривается, как равномерно распределенная по ячейке, при сгущении сетки приходим к значению в точке.

На втором этапе решения задачи осуществляется расчет химической трансформации веществ в атмосферном воздухе с использованием таких зависимостей [14–15]:

$$\frac{dC_{NO}}{dt} = -k_1 \cdot C_{NO} \cdot C_{O_3} + J \cdot C_{NO_2}, \quad (7)$$

$$\frac{dC_{NO_2}}{dt} = k_1 \cdot C_{NO} \cdot C_{O_3} - J \cdot C_{NO_2}, \quad (8)$$

$$\frac{dC_{O_3}}{dt} = -k_1 \cdot C_{NO} \cdot C_{O_3} + J \cdot C_{NO_2}. \quad (9)$$

Известно, что выброс  $NO_2$  составляет величину порядка 5 % от выброса  $NO_x$ , а остальная часть выброса, порядка 95 %, – это выброс  $NO$ . Химические реакции и реакция фотолиза взаимосвязаны в атмосфере. Скорость фотолиза и параметры скорости реакции, зависящие от температуры, определяются выражениями (10) – (11) [15].

$$J = 8,14 \cdot 10^{-3} (0,97674 + 8,37 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 273,15) + 4,5173 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 273,15)^2), \quad [s^{-1}] \quad (10)$$

$$k_1 = 44,05 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{1370}{T}\right), [\text{ppb}^{-1}\text{s}^{-1}]. \quad (11)$$

Диоксид азота разлагается с выделением оксида азота, а последний окисляется озоном. В результате ряда последовательных реакций одна молекула оксида азота способствует уничтожению в среднем 10 молекул озона, ведь  $NO_2$  более токсичен чем  $NO$ .

Для многочисленного решения уравнений (7) – (9) с учетом зависимостей (10) – (11) разработана программа, реализующая метод Эйлера [19].

В работе рассматривается рассеивание выбросов от автотранспорта для случая, когда возле автодороги располагаются защитные барьеры (экраны), а местность имеет сложный рельеф, как показано на рис. 1. В этом случае, в области исследования будет формироваться неравномерное поле скорости воздушного потока. Это поле необходимо знать для решения моделирующих уравнений (4) – (6). Для расчета воздушного потока в таких условиях используется модель потенциального течения. В этом случае, моделирующим уравнением является уравнение Лапласа для потенциала скорости [18–19]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (12)$$

Ставятся соответствующие граничные и начальные условия (рис. 1):

- на границе  $A$  – поток входит в расчетную область, для потенциала скорости ставится граничное условие Неймана  $\frac{\partial P}{\partial x} = U$ , где  $U$  – известное значение скорости ветрового потока  $U = U_1 \cdot (y / y_1)^{n_1}$ ,

где  $U_1$  – значение скорости ветра на некоторой фиксированной высоте  $y_1 = 10$  м,  $n_1 \approx 0,15 - 0,69$ , так как зависит от шероховатости подстилающей поверхности и класса устойчивости атмосферы, в работе принималось значение  $n_1 = 0,15$ ;

- на границе  $B$  – поток выходит из расчетной области, для потенциала скорости ставится граничное условие Дирихле  $P = P_0 + const$ , где  $P_0$  – некоторая числовая константа равная 100;

- на границе  $C$  – верхняя граница, твердая непроницаемая стенка, ставится условие непроникания  $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ , поскольку в численных расчетах не может быть бесконечной границы, то ее выбирают на достаточном расстоянии, где кривизна линий тока незначительна;

- на границе  $D$  – нижняя граница, твердая непроницаемая стенка, ставится условие непроникания  $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$ ;

- на всех твердых стенках насыпи, экранов и автомобиля в зависимости от направления нормали должно выполняться условие непроникания.

Компоненты вектора скорости воздушного потока рассчитываются на основе зависимостей [18]:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y} \quad (13)$$

### 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для численного интегрирования уравнения Лапласа (12) используется метод условной аппроксимации. Сначала уравнение Лапласа (12) приводится к уравнению эволюционного вида с применением установления решения по времени [19]:

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (14)$$

где  $\eta$  – фиктивное время, при  $\eta \rightarrow \infty$ , решение уравнения (14) стремится к решению уравнения Лапласа (12). А именно, стационарное уравнение (12) является предельным случаем нестационарного уравнения (14), т.е. когда решение уравнения (14) перестает изменяться во времени и выходит на стационарный режим, то это и есть решение уравнения (12). Такой подход введен Самарским А.А. и Марчуком Г.И. при создании методов расщепления. Для решения данного уравнения необходимо задать начальное условие, то есть поле потенциала при  $\eta = 0$ . Например, можно принять  $P = 0$  во всей расчетной области при  $\eta = 0$ .

Для численного интегрирования используется разностная аппроксимация производных. Рассматривается равномерно распределенная прямоугольная сетка в двумерном пространстве, каждая ячейка сетки имеет размеры  $\Delta x, \Delta y$  вдоль соответствующей декартовой оси, координаты узлов сетки вычисляются, как  $(x, y)_{i,j} = (i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y)$ ,  $i, j \in Z$ . Время равномерно дискретизируется  $\eta = n \cdot \Delta \eta$ . Функция  $P(x, y, \eta)$  выражается в любом узле дискретным аналогом [18–19]:

$$P(x, y, \eta) = P(i \cdot \Delta x, j \cdot \Delta y, n \cdot \Delta \eta) = P_{i,j}^n / \quad (15)$$

Для решения уравнения (14) применяется метод условной аппроксимации, в этом случае разностные уравнения имеют вид:

- на первом шаге расщепления

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta \eta} = \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] \quad (16)$$

- на втором шаге расщепления

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta \eta} = \left[ \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[ \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (17)$$

Таким образом, при использовании метода условной аппроксимации численное решение двумерного уравнения (12) для определения потенциала скорости осуществляется двумя шагами (16) и (17). На первом находится «промежуточное» значения потенциала  $P_{i,j}^{n+1/2}$  на временном слое « $n+1/2$ », а на втором – «окончательное» значение потенциала  $P_{i,j}^{n+1}$  на временном слое « $n+1$ ». Расчет заканчивается, когда выполняется условие  $|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n| \leq \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – точность расчетов,  $\varepsilon = 10^{-3} \div 10^{-6}$ ,  $n$  – номер итерации (количество шагов по времени).

По известным значениям потенциала скорости рассчитываются компоненты вектора скорости:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (18)$$

Для описания численного метода решения уравнений переноса (4) – (6), запишем их в виде обобщенного уравнения конвективно- диффузионного рассеивания примеси:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^n Q_{S_i}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (19)$$

где  $S$  – концентрация  $[NO]$ ,  $[NO_2]$ ,  $[O_3]$ ;  $u, v$  – компоненты вектора скорости;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $Q_{S_i}$  – интенсивность эмиссии  $[NO]$ ,  $[NO_2]$ ,  $[O_3]$ ;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $(x_i, y_i)$  – координаты расположения источника эмиссии  $[NO]$ ,  $[NO_2]$ ;  $t$  – время.

Для решения уравнения (19) ставятся следующие граничные условия (рис. 1):

- на границе  $A$  – поток входит в расчетную область, для концентрации данной примеси ставится граничное условие вида  $S = S|_{\text{вх}}$  – фоновая концентрация в момент времени  $t=0$ , при отсутствии данных значение концентрации принимается равной нулю;

- на границе  $B$  – поток выходит из расчетной области, в конце расчетной области в численной модели выполняется граничное условие вида  $\frac{\partial S}{\partial x} = 0$ , с физической точки зрения это условие означает, что не учитывается процесс диффузии на границе выхода потока;

- на границах  $C$ ,  $D$  и на всех твердых стенках насыпи, экранов и автомобиля в зависимости от направления нормали должно выполняться условие непроникания.

Для численного интегрирования уравнения (19) осуществляется его расщепление:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (20)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (21)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{S_i}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (22)$$

Для численного решения уравнения (20) применяется следующая двухшаговая схема расщепления:

- на первом шаге используется зависимость

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2}, \quad (23)$$

- на втором шаге используется зависимость

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2}, \quad (24)$$

$$\text{где } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}.$$

Для численного решения уравнения (21) применяется следующая двухшаговая схема расщепления

- на первом шаге используется зависимость

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2}, \quad (25)$$

- на втором шаге используется зависимость

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2}, \quad (26)$$

$$\text{где } v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Для численного интегрирования уравнения (22) используется метод Эйлера [18]. Данный метод также применяется для численного решения уравнений (7) – (9).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Разработанный метод прогнозирования был использован для решения задачи по оценке

уровня загрязнения возле автодороги при наличии источника эмиссии (автотранспорта), с наличием экрана и при его отсутствии. Была создана программа численного расчета «Barrier».

Рассматривалось несколько сценариев расположения автотранспорта и экранов. Расчеты выполнялись при следующих данных: скорость воздушного потока 5 м/с, средняя интенсивность эмиссии оксидов азота  $Q_{NO_x} = 4,8$  г/(с·м), из которых  $NO_2$  составляет величину порядка 5% от выброса  $NO_x$ , а  $NO$  – 95 %, геометрические размеры области – 25 м по оси  $Ox$  и 12,5 м по оси  $Oy$ , которая направлена вертикально вверх. Координатами источника выброса  $NO$  и  $NO_2$  являются координаты местоположения отверстия выхлопной трубы автомобиля. Принимается, что это точечный источник выброса, поэтому в математической модели он задается дельта-функцией Дирака  $\delta_{ij}$ , а в численной модели – положением разностной ячейки, в которой располагается источник выброса, а именно  $Q_{числ} = Q(t)_{ист.} / (\Delta x \Delta y)$ , где  $Q(t)_{ист.}$  – реальный выброс  $NO$  и  $NO_2$  от автомобиля г/(с·м),  $\Delta x \Delta y$  – площадь разностной ячейки. Автодорога моделируется, как набор точечных источников. Так как используется двухмерная модель, то направление ветра выбрано поперек автомагистрали (вдоль оси  $Ox$ ). Решается модельная задача с учетом действия экрана, как барьера, в качестве автотранспорта рассматривались легковые автомобили с размерами: ширина – 1,7 м, высота – 1,6 м. Однако в расчетная программа позволяет учитывать любые размеры автотранспорта.

На первом этапе численных исследований проводились расчеты при действующем источнике эмиссии (автотранспорте) на первой и четвертой полосах автодороги, без присутствия экрана (рис. 2), с наличием экрана высотой  $H=2,8$  м (рис. 3) и высотой  $H=5$  м (рис. 4).

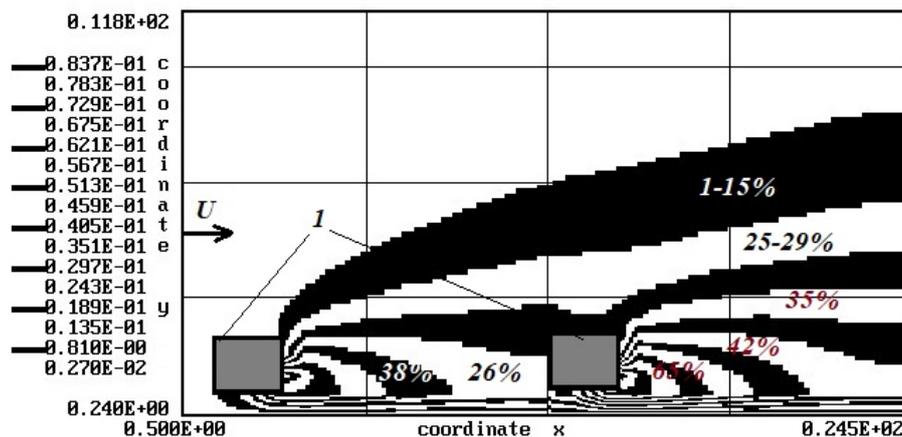


Рис. 2. Распределение поля концентрации  $NO$  при отсутствии экрана, где 1 – источники эмиссии (автомобили)

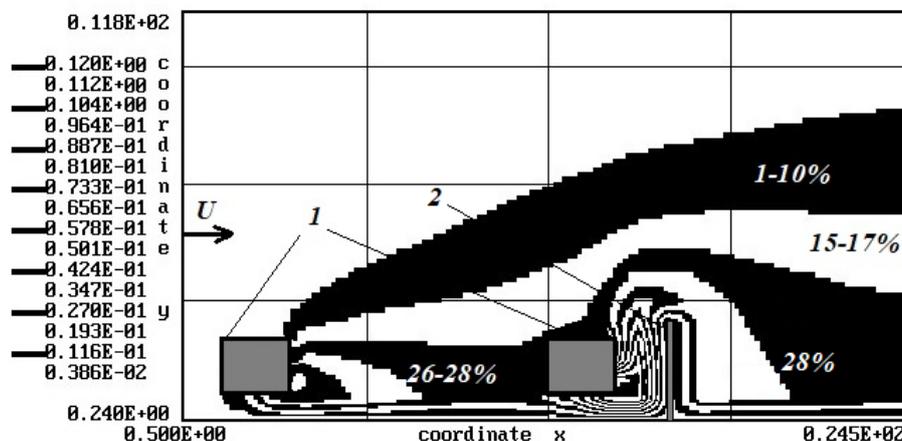


Рис. 3. Распределение поля концентрации  $NO$  при наличие экрана  $H=2,8$  м: 1 – источники эмиссии (автомобили), 2 – экран

На рисунках представлено распределение концентрации  $NO$  в процентном содержании от максимального значения концентрации. Хорошо видно, что экран высотой  $H=2,8$  м позволяет снизить значение концентрации  $NO$  за экраном от 42% до 28%, а экран высотой  $H=5$  м понижает значение концентрации до 16 %.

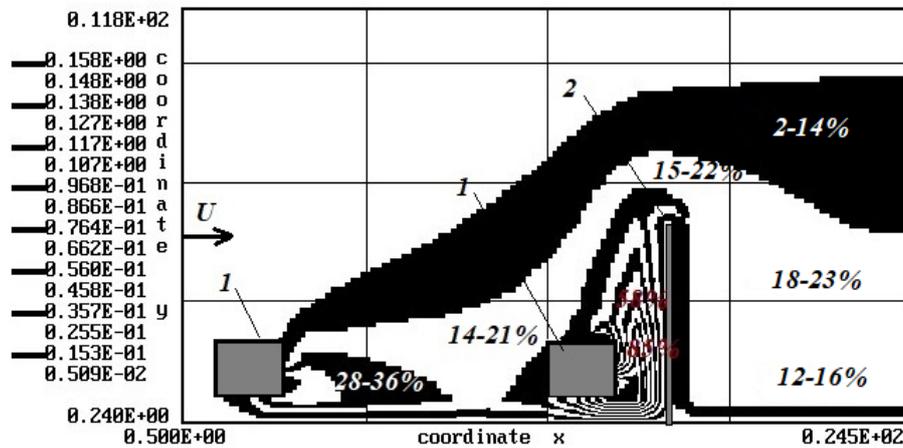


Рис. 4. Распределение поля концентрации  $NO$  при наличии экрана  $H=5$  м: 1 – источники эмиссии (автомобили), 2 – экран

На втором этапе численных исследований проводилось сравнение уровня концентрации за экраном при разном количестве источников эмиссии на дороге. А именно, расчеты выполнены при действующем источнике эмиссии (автотранспорте) только на первой полосе автодороги (рис. 5), на первой и четвертой полосах автодороги (рис. 4), на первой, второй и четвертой полосах автодороги (рис. 6) при наличии экрана высотой  $H=5$  м в каждом варианте расчета.

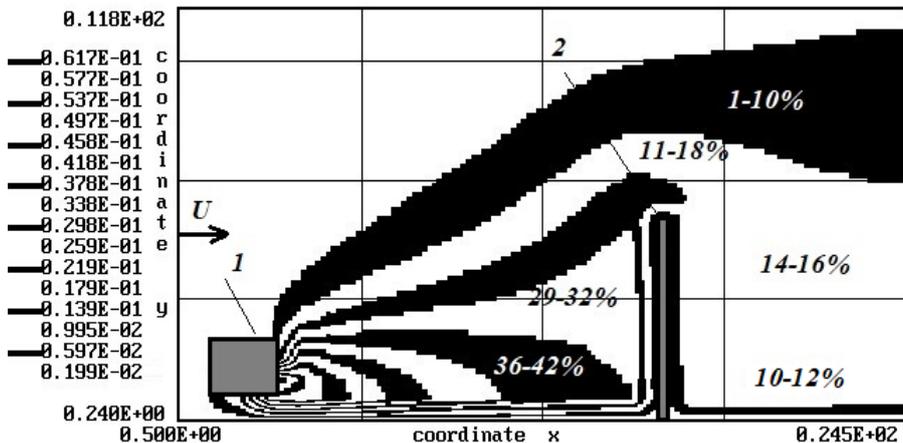


Рис. 5. Поле концентрации  $NO$  при наличии экрана  $H=5$  м: 1 – один источник эмиссии, 2 – экран

Из полученного распределения концентрации можно видеть, что увеличение количества источников эмиссии на автодороге приводит к увеличению значения концентрации  $NO$  за экраном от 10% до 18% даже при наличии экрана достаточно большой высоты  $H=5$  м. На третьем этапе численных исследований проводились сравнительные расчеты при действующих источниках эмиссии (автотранспорте) с учетом их геометрической формы (в виде прямоугольников) и без учета геометрии, т.е. просто как точечного источника (рис. 7), согласно публикаций других авторов [7].

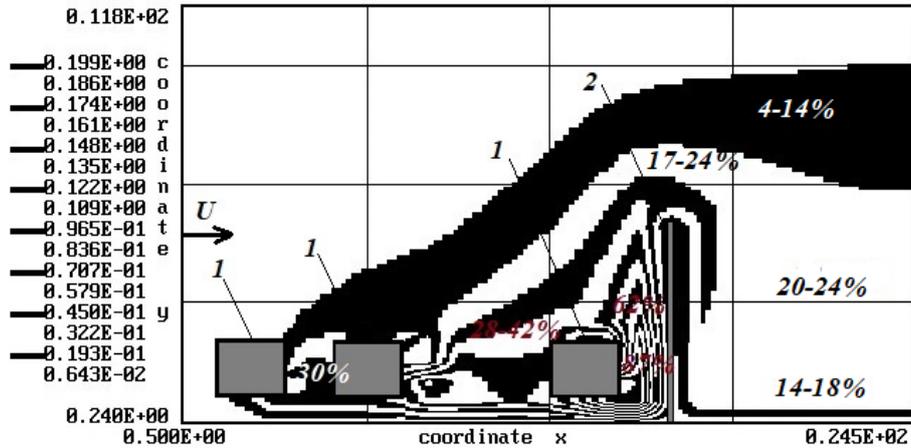


Рис. 6. Поле концентрации *NO* при наличие экрана  $H=5$  м: 1 – три источника эмиссии, 2 – экран

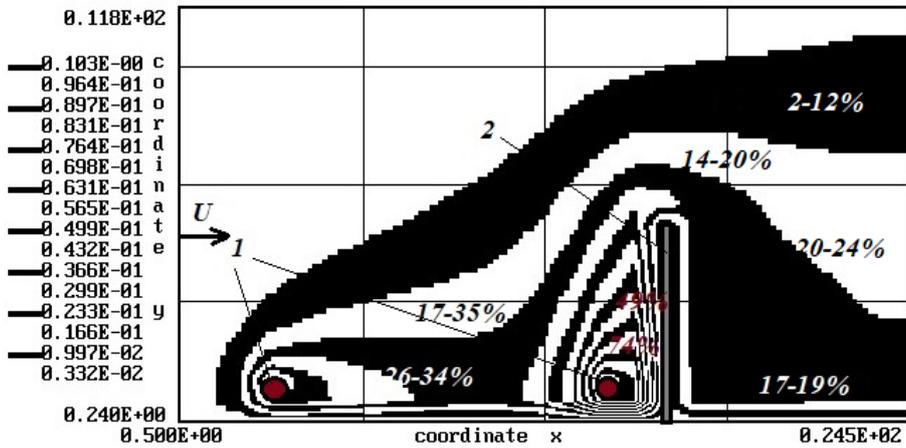


Рис. 7. Поле концентрации *NO* при наличие экрана  $H=5$  м: 1 – два источника эмиссии без учета геометрии, 2 – экран

Сравнение распределения концентрации на рисунке 4 и рисунке 6 показывает, что не учет геометрии приводит к завышенным значениям концентрации приблизительно на 5%.

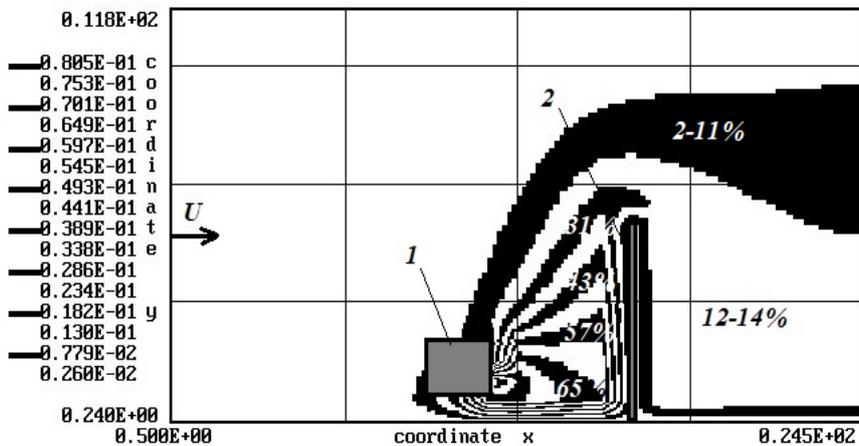


Рис. 8. Поля концентрации *NO* при наличие вертикального экрана  $H=5$  м: 1 – один источник эмиссии на третьей полосе движения, 2 – экран

На следующем этапе исследований, проводились расчеты уровня концентрации загрязнителя с учетом изменения геометрии экрана. Как известно, экраны выполняются не только вертикальными, т.е. перпендикулярными поверхности земли, но и других форм, а именно различной кривизны профиля и наклона относительно земли. В данной работе предлагается изменение формы экрана за счет дополнительной горизонтальной составляющей длиной 1,25 м на высоте 3,75 м от поверхности земли (рис. 8-9).

Результаты расчетов показывают, что уровень концентрации за экраном на высоте органов дыхания человека 1,7 м снижается от 14% до 8%.

Известно, что при наличии препятствий в расчетной области формируются зоны, где линии тока имеют большую кривизну. При таких условиях некоторые численные модели теряют свою устойчивость, что ограничивает их практическое использование, поскольку в реальных условиях существует большое количество комбинаций расположения «автодороги и экрана». Выбор таких сценариев расчета показывает, что построенная численная модель обладает большим запасом устойчивости и может быть применена для расчета зон загрязнения в областях с различной внутренней геометрией.

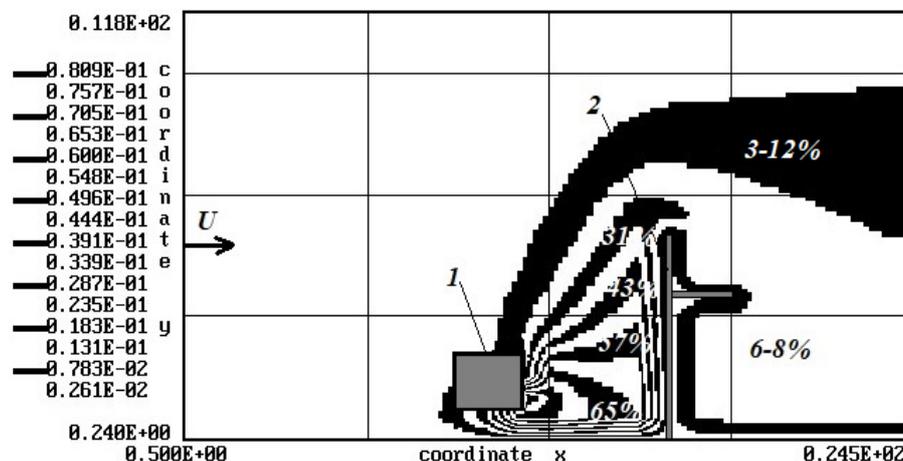


Рис. 9. Поля концентрации  $NO$  при наличии вертикального экрана  $H=5$  м и горизонтальной полки: 1 – два источника эмиссии без учета геометрии, 2 – экран

Построенная численная модель позволяет получить картины зон химического загрязнения и выделить подзоны, где такое загрязнение является более интенсивным (рис. 2–6). Выявление таких подзон позволяет рекомендовать меры защиты по минимизации уровня загрязнения, например, за счет изменения высоты экрана. Из полученного распределения поля концентрации  $NO$  (рис. 3–4) видно, что увеличение высоты экранов приводит к снижению интенсивности загрязнения в области возможного места проживания населения. Тем не менее, как видно из рисунка 4, в зоне между автомобилем, который находится на четвертой полосе движения и экраном, наблюдается увеличение интенсивности загрязнения воздушной среды. Это связано с тем, что наличие экрана приводит к образованию застойных зон в месте его расположения со стороны дороги, где скорость воздушного потока невелика. Таким образом, в этих областях наблюдаются локально высокие концентрации химического загрязнения, что требует внедрения дополнительных технических средств для минимизации уровня загрязнения в этих застойных зонах (локальных отсосов).

## 5. CONCLUSIONS

Предложена численная модель для расчета зон загрязнения возле автодороги. Для описания процесса рассеивания загрязняющих веществ использовалось уравнение массопереноса,

учитывающее атмосферную диффузию и конвективный перенос примеси. Для расчета поля скорости применялась модель потенциального течения. Разработанная численная модель учитывает химическую трансформацию выбросов  $NO$  и  $NO_2$  от автотранспорта в атмосфере. Особенностью разработанной модели является возможность проведения расчетов с учетом наличия экранов возле автодороги различной высоты и учета геометрии автомобиля. Время проведения одного вычислительного эксперимента составляет 10 с. Данная модель может быть использована при проведении серийных расчетов для предварительной оценки уровня загрязнения воздушной среды возле автодороги при проектировании защитных экранов.

На основе проведенных вычислительных экспериментальных установлены основные закономерности поведения воздушного потока и изменения концентрации химического загрязнения в зависимости от наличия экранов разной высоты, размещения источника загрязнения и геометрии автомобиля. Показано, что использование экранов высотой 2,8 м снижает уровень загрязнения за автодорогой на 14%, а использование экранов 5 м приводит к снижению концентрации на 20-26%.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении учета рельефа местности [20] и совместного использования для снижения уровня химического загрязнения воздушной среды возле автодороги экранов и других технических средств (локальных отсосов).

## References

1. Внукова Н.В. & Желновач Г.М. Вибір екологічно значимих параметрів автотранспортних систем для оцінки екологічної небезпеки придорожного простору. *Екологічна безпека*. 2011. Vol. 2. No. 12. P. 119-123. [In Ukrainian: Vnukova N.V. & Zhelnovach G.M. Selection of ecologically significant parameters of autotransport systems for assessment of ecological danger of roadside space. *Ecological safety*].
2. Бабій В.Ф. & Худова В.М. & Кондратенко О.Є. & Пономаренко А.М. Вплив транспортних чинників на екологічний стан великих міст. *Збірник наукових праць*. 2011. Vol. 85. P. 57-60. [In Ukrainian: Babiy V.F. & Khudova V.M. & Kondratenko O.YE. & Ponomarenko A.M. Influence of transport factors on the ecological condition of large cities. *Collection of scientific works*].
3. Черниченко І.О. & Першегуба Я.В. & Литвиненко О.М. & Швагер О.В. Особливості формування канцерогенного ризику для населення, що проживає в зоні впливу автомагістралі. *Збірник наукових праць*. 2010. Vol. 56. P. 159-167. [In Ukrainian: Chernychenko I.O. & Pershehuba YA.V. & Lytvynenko O.M. & Shvaher O.V. Features of carcinogenic risk formation for the population living in the area of influence of the highway. *Collection of scientific works*].
4. Прищепов О.Ф. & Левицька О.С. Особливості розсіювання шкідливих речовин викидів автотранспорту у повітрі в умовах міста. Наукові праці: наук.-метод. журнал. *Техногенна безпека*. 2009. Vol. 111. No. 98. P. 139-146. [In Ukrainian: Prischepov O.F. & Levitskaya O.S. Scientific works: Scientific method. *Journal. Man-made safety*].
5. Bruno L. & Fransos D. & Giudice A.Lo. Solid barriers for windblown sand mitigation: Aerodynamic behavior and conceptual design guidelines. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*. 2018. № 173. P. 79-90.
6. Li B. & Sherman D.J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review. *Aeolian Research*. 2015. No. 17. P. 33-48.
7. Wonsik C. & Shishan Hu & Meilu He & Kozawa K. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles. Available at: [http://www.aqmd.gov/docs/defaultsource/technology\\_research/TechnologyForums/near-road-itigationmeasures/near\\_road\\_mitigation-agenda-presentations.pdf](http://www.aqmd.gov/docs/defaultsource/technology_research/TechnologyForums/near-road-itigationmeasures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf).
8. Hagler Gayle S.W. & et al. Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment*. 2011. Vol. 45. Is. 15. P. 2522-2530. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.030>.

9. Maoa Y. & Wilsona J.D. & Kortb J. Effects of a shelterbelt on road dust dispersion. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 79. P. 590-598. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.015>.
10. Jason Y. & et al. Modeling multi-scale aerosol dynamics and micro-environmental air quality near a large highway intersection using the CTAG model. *Science of the Total Environment*. 2013. Vol. 443. P. 375-386. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.102>.
11. Venkatram A. & Snyder M. & Isakov V. Modeling the impact of roadway emissions in light wind, stable and transition conditions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 24. P. 110-119.
12. Venkatram A. & Snyder M. & Isakov V. & Kimbrough S. Impact of wind direction on near-road pollutant concentrations. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 80. P. 248-258.
13. Heist D. & et al. Estimating near-road pollutant dispersion: A model inter-comparison. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2013. Vol. 25. P. 93-105.
14. Overman H.T. *Simulation model for NOx distribution in a street canyon with air purifying pavement*. Master thesis. University Twente, Netherlands. 2009. P. 1-99.
15. Merah A. & Nouredine A. Modeling and Analysis of NOx and O3 in a Street Canyon. *Der Pharma Chemica*. 2017. No. 9(19). P. 66-72.
16. Zhong J. & Cai X. & Bloss W. Modelling the dispersion and transport of reactive pollutants in a deep urban street canyon. *Environmental Pollution*. 2015. Vol. 200. P. 42-52.
17. Марчук Г.И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва: Наука, 1982. 320 p. [In Ukrainian: Marchuk G.I. *Mathematical modeling in the problem of the environment*. Moscow: Science].
18. Згуровский М.З. & Скопецкий В.В. & Хрущ В.К. & Беляев Н.Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Київ: Наукова думка. 1997. 368 p. [In Ukrainian: Zgurovsky M.Z. & Skopetsky V.V. & Khrushch V.K. & Biliaiv M.M. *Numerical modeling of the spread of pollution in the environment*. Kiev: Naukova dumka].
19. Самарский А.А. & Михайлов А.П. *Математическое моделирование*. Москва: Физмат лит, 2001. 320 p. [In Ukrainian: Samarsky A.A. & Mikhailov A.P. *Mathematical Modeling*. Moscow: Fizmatlit].
20. Sang J.J. A CFD Study of Roadside Barrier Impact on the Dispersion of Road Air Pollution. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. 2015. Vol. 9-1. P. 22-30. Available at: <http://dx.doi.org/10.5572/ajae.2015.9.1.022>.