

UDC 502.3:504.5:629.33

M. M. BILIAIEV^{1*}, O. S. SLAVINSKA^{2*}, R. V. KYRYCHENKO^{3*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Dep. «Manufacturing and Property Management», National Transport University of Ukraine, Suvorov St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-5163-5645

^{3*}Dep. «Manufacturing and Property Management», National Transport University of Ukraine, Suvorov St., 1, Kyiv, Ukraine, 01010, tel. +38 (044) 280 82 03, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9918-3895

NUMERICAL SIMULATION OF POLLUTION DISPERSION IN URBAN STREET

Purpose. The scientific paper solves the question of 2D numerical model development, which allows quick computation of air pollution in streets from vehicles. The aim of the work is numerical model development that would enable to predict the level of air pollution by using protective barriers along the road. **Methodology.** The developed model is based on the equation of inviscid flow and equation of pollutant transfer. Potential equation is used to compute velocity field of air flow near road in the case of protection barriers application. To solve equation for potential flow implicit difference scheme of «conditional approximation» is used. The implicit change – triangle difference scheme is used to solve equation of convective – diffusive dispersion. Numerical integration is carried out using the rectangular difference grid. Method of porosity technique («markers method») is used to create the form of comprehensive computational region. Emission of toxic gases from vehicle is modeled using Delta function for point source. **Findings.** Authors developed 2D numerical model. It takes into account the main physical factors affecting the process of dispersion of pollutants in the atmosphere when emissions of vehicle including protection barriers near the road. On the basis of the developed numerical models a computational experiment was performed to estimate the level of air pollution in the street. **Originality.** A numerical model has been created. It makes it possible to calculate 2D aerodynamics of the wind flow in the presence of noises and the process of mass transfer of toxic gas emissions from the motorway. The model allows taking into account the presence of the car on the road, the form of a protective barrier, the presence of a curb. Calculations have been performed to determine the contamination zone formed at the protective barrier that is located at the motorway. **Practical value.** An effective numerical model that can be applied in the development of environmental protection measures for the operation of road transport in the city is considered. The developed model allows estimating sizes, the form and intensity of a zone of pollution at a motorway.

Keywords: air pollution; urban streets; pollution dispersion; numerical simulation

Introduction

Pollution from vehicles in urban streets is very intensive and can cause harm to humans. For this purpose, it is necessary to predict the level of pollution in streets. Physical modeling, in this case, is very expensive [8]. For quick prediction empirical models are used [1]. These models are convenient in practice, especially when we must run many «pilot» calculations. But these models do not take into account some important properties of pollutant dispersion process in streets. The main problem is that the process of air pollution in streets takes part in the region having comprehensive geometrical form (presence of buildings, different obstacles, etc). The alternative way is the numerical simulation of this process. Many authors

apply CFD simulation to solve the problem [1, 3, 6, 8–10]. As a rule, to obtain flow pattern in streets foreign authors use Navier – Stokes equations (this is the model of viscous fluid) coupled with turbulent models. Very often commercial codes are used for this purpose. Worthy of note, that application of Navier – Stokes equations needs application of very fine computational grid during the computational experiment to simulate in detail the process of vortexes formation and their dispersion and interaction in the region. Using the model of viscous fluid, we must use very fine grid inside the boundary layers. This is a real problem if we have big dimensions of the buildings, obstacles in streets. So, in case of Navier – Stokes equations application it is necessary to use powerful PC and every computational experiment consumes much

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

time. This is not convenient when we must run a lot of practical calculations considering different scenario of air pollution in streets and, especially, when we try to find the effective protection measures because in this case we must consider many alternative variants of protection. In this case it would be better to split the study in two steps. At the first step we may find the «satisfying» variant using numerical model which does not consume much time and not take into account some physical features of the process. After that, at the second step, we may use more powerful model to compute in detail the variant of protection which has been chosen. So, for quick calculations at the first step it is important to have CFD models which consume not much computational time but they allow to take into account such important features as obstacles, emission rate, etc.

Purpose

The purpose of this paper is development a numerical model for quick computing of the local air quality near roads.

Aerodynamic equation

To simulate the wind pattern near the road we use model of potential flow. In this case the governing equation is [5]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

where P is the potential of speed.

The wind velocity components are calculated as follows:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Boundary conditions equation (1) are discussed in [1]. To perform numerical integration of this equation rectangular grid was used.

To solve equation of potential flow (1) we used the difference scheme of «conditional approximation». In this case, first of all, we transformed Eq. 1 to equation having «evolution type» [5]

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

where η is «fictitious» time.

For $\eta \rightarrow \infty$ the solution of equation (2) tends to the solution of equation (1).

After approximation of Eq. 2, we split it in the sequence of two difference equations having implicit form [5]

$$\begin{aligned} \frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} &= \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right], \\ \frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Unknown value of $P_{i,j}$ can be easily determined from each difference equation (3) using explicit formulae of «running calculation». As the «initial» condition for Eq. 2 we may use, for example, $P=0$ for $\eta=0$.

Pollutant Transport Equation

To simulate the pollutant dispersion near road equation of convective – diffusive transfer is used [1, 4, 7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \\ = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \end{aligned} \quad (4)$$

where C is mean concentration

$$C(x, y) = \frac{1}{W} \int_0^W C(x, y, z) dz.$$

W is width of the computational region; u, v are the wind velocity components; $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ are the diffusion coefficients; Q_i is rate of emission; $\delta(x - x_i), \delta(y - y_i)$ – are Dirac delta function; t is time.

Initial and boundary conditions for Eq. 4 are described in [1, 4].

Before solving Eq. (2) we made it's physical splitting into the sequence of three equations. These are the following equations:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i(t) \delta(r - r_i),$$

where $\delta(r - r_i)$ is Dirac delta function; $r_i = (x_i, y_i)$ are the coordinates of the point source.

The first equation in (5) describes pollutant transfer along trajectories. The second equation in (5) describes the diffusive dispersion of pollutant. The third equation in (5) describes concentration change under the action of source Q .

To solve the first and the second equations in (5) the implicit change – triangle difference scheme was used [1]. To solve the third equation from (5) Euler method was used [5].

Numerical integration of difference equations is performed using rectangular grid. Values of P , C are determined in the centers of computational cells, values of u , v are determined at the sides of the computational cells. For coding difference equations, we used FORTRAN language.

Findings

Developed numerical model and code were used to compute CO concentrations near road which has barrier at the curb. Numerical simulation was performed for two scenarios. The first one is scenario where barrier has a form of vertical plate (Fig. 1). The second scenario is application of barrier which has additional «short wing» at the top (Fig. 2). «Body» of the vehicle is represented as rectangular. Its form and form of the curb, barrier is represented in numerical model using «markers» (porosity technique). Outlet opening of the vehicle is a passive source of emission. It means that we don't take into account speed of gases which move from it. Arrow indicates the wind direction.

Results of numerical simulations are shown in Fig. 3–5. Fig. 3, 4 represent CO concentration field near road. We can see that application of barrier with «short wing» allows to reduce the width of contaminated zone behind the barrier.

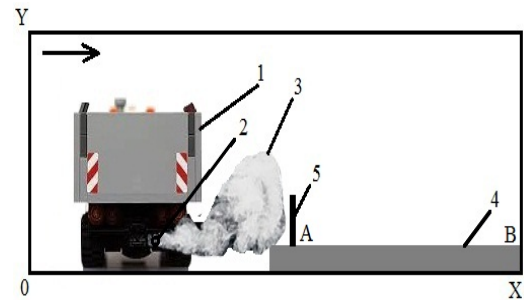


Fig. 1. Sketch of computational region (the first scenario): 1 – vehicle; 2 – source of emission (outlet opening); 3 – plume; 4 – curb; 5 – barrier

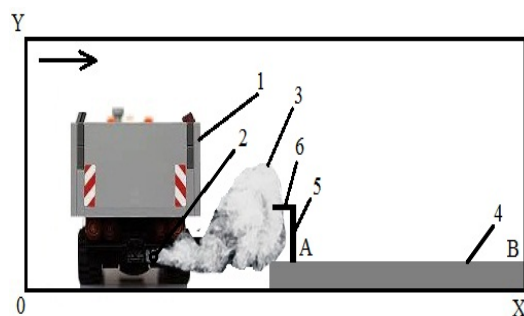


Fig. 2. Sketch of computational region (the second scenario):

1 – vehicle; 2 – source of emission (outlet opening); 3 – plume; 4 – curb; 5 – barrier; 6 – «short wing»

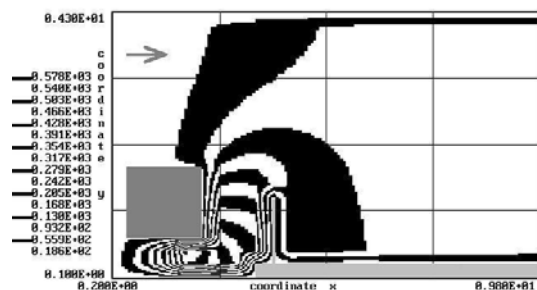


Fig. 3. Computed CO concentration (barrier without «wing»)

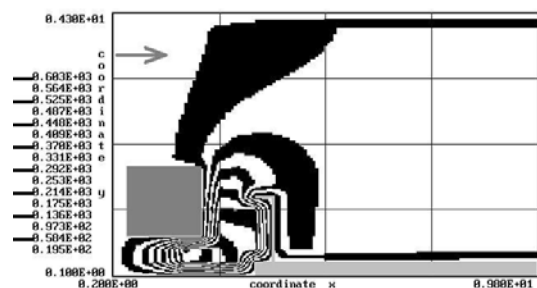


Fig. 4. Computed CO concentration (barrier with «short wing»)

In Table 1 we present computed CO concentration behind barriers at height $h=1,7$ m.

Table 1

Computed CO concentration at height $h=1.7$ m

Distance from barrier	Concentration (scenario: no wing)	Concentration (scenario: short wing)
0.6 m	1.01 mg/m ³	0.94 mg/m ³
1.0 m	0.95 mg/m ³	0.88 mg/m ³
1.4 m	0.89 mg/m ³	0.82 mg/m ³
1.8 m	0.85 mg/m ³	0.78 mg/m ³

As we can see from Table 1 application of barrier having «short wing» allows reduce CO concentrations near the road.

Worthy of note that computational time was about 5 sec. for each scenario. It allows to use the developed numerical model for practical application when series of computational experiments must be run.

Originality and practical value

A model has been developed to compute concentrations near roads. Numerical model is based on application of mass transfer equation and equation of potential flow.

The peculiarity of the developed model is the use quick calculation of contaminated zones and account of geometrical form of vehicle, curb, barriers near the road.

Conclusions

Numerical model for estimating the level of atmospheric air pollution near roads is proposed. Proposed numerical model allows to predict level of pollution with account of geometrical form of vehicle, curb, barriers near the road, intensity of emission rate. The solution of the aerodynamic problem is based on the numerical integration of equation for potential flow. This allows to perform quick calculation of wind pattern near road using PC which are available now in Ukraine. To predict toxic gases concentrations near road convective – diffusive equation is used. Numerical integration of this equation is performed using implicit difference scheme. Using the developed numerical model some numerical experiments were performed to study the influence of barrier form on intensity of local contamination near road.

Further improvement of the model should be carried out in the direction of creating a 3D numerical model.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Беляев, Н. Н. Моделирование загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта на улицах городов : монография / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова, П. С. Кириченко. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 159 с.
2. Беляев, Н. Н. Прогноз загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта с учетом химической трансформации вредных веществ / Н. Н. Беляев, Е. С. Славинская, Р. В. Кириченко // Наука та прогрес транспорту. – 2017. – № 3 (69). – С. 15–22. doi: 10.15802/stp2017/104549.
3. Беляев, Н. Н. CFD прогнозирование процесса загрязнения воздушной среды на улицах / Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова // Екологія і природокористування : зб. наук. пр. Ін-ту проблем природокористування та екології НАН України. – Київ, 2013. – Вип. 17. – С. 188–194.
4. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
5. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
6. A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions / I. Düring, W. Bächlin, M. Ketzel, A. Baum, U. Friedrich, S. Wurzel // Meteorologische Zeitschrift. – 2011. – Vol. 20. – Iss. 1. – P. 67–73. doi: 10.1127/0941-2948/2011/0491.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953.
8. Nguyen, T. N. Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons / T. N. Nguyen, T. C. Nguyen, V. T. Nguyen // Advanced Science and Technology Letters. – 2015. – Vol. 120. – P. 770–777. doi: 10.14257/astl.2015.120.152.
9. Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements / Ch.-H. Chang, J.-S. Lin, C.-M. Cheng, Y.-S. Hong // J. of Marine Science and technology. – 2013. – Vol. 21, No. 2. – P. 119–126.
10. Overman, H. T. J. Simulation model for NO_x distributions in a street canyon with air purifying pavement: master thesis / H. T. J. Overman ; University of Twente. – Enschede, Netherlands, 2009. – 69 p.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. С. СЛАВІНСЬКА^{2*}, Р. В. КИРИЧЕНКО^{3*}^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882^{2*}Каф. «Управління виробництвом та майном», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-5163-5645^{3*}Каф. «Управління виробництвом та майном», Національний транспортний університет, вул. Суворова, 1, Київ, Україна, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9918-3895

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ НА МІСЬКІЙ ВУЛИЦІ

Мета. У науковій статті необхідно вирішити питання щодо розробки 2D чисельної моделі, яка дозволила б швидко розрахувати процес забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту. Передбачено також створити чисельну модель, що давала б можливість прогнозувати рівень забруднення атмосферного повітря при використанні захисних бар'єрів біля дороги. **Методика.** Використано розроблену модель, яка базується на рівнянні невязкої рідини та рівнянні масопереносу. Рівняння для потенціалу швидкості використовується для розрахунку поля швидкості повітряного потоку при експлуатації бар'єрів. При вирішенні рівняння для потенціалу швидкості задіяна неявна різницева схема «умовної апроксимації». Для чисельного рішення задачі масопереносу вживається неявна поперемінно-трикутна різницева схема. Чисельне інтегрування здійснюється на прямокутній різницевій сітці. Для формування складної форми розрахункової області використовуються маркери, а для моделювання джерела емісії – модель точкового джерела, яка формується за допомогою дельта-функції Дірака. **Результати.** Авторами розроблено 2D чисельну модель, яка враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання шкідливих речовин в атмосфері при викидах від автотранспорту з урахуванням розміщення захисних бар'єрів біля дороги. На основі побудованих чисельних моделей проведено обчислювальний експеримент із оцінки рівня забруднення повітряного середовища на вулиці. **Наукова новизна.** Створено чисельну модель, яка дозволяє розрахувати 2D аеродинаміку вітрового потоку в умовах наявності перешкод та процес масопереносу викидів токсичних газів від автотранспорту. Модель дозволяє враховувати наявність автомобіля на дорозі, форму захисного бар'єру, присутність бордюру. Виконано розрахунки по визначенню зони забруднення, що формується біля захисного бар'єру, розташованого біля автомагістралі. **Практична значимість.** Розглянута ефективна чисельна модель, яка може бути застосована при розробці заходів із охорони навколишнього середовища при експлуатації автомобільного транспорту в місті. Розроблена модель дозволяє оцінити розміри, форму та інтенсивність зони забруднення біля автомагістралі.

Ключові слова: забруднення атмосфери; міські вулиці; поширення забруднень; чисельне моделювання

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, О. С. СЛАВИНСКАЯ^{2*}, Р. В. КИРИЧЕНКО^{3*}^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882^{2*}Каф. «Управление производством и имуществом», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-5163-5645^{3*}Каф. «Управление производством и имуществом», Национальный транспортный университет, ул. Суворова, 1, Киев, Украина, 01010, тел. +38 (044) 280 82 03, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0001-9918-3895

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ГОРОДСКОЙ УЛИЦЕ

Цель. В научной статье необходимо решить вопрос разработки 2D численной модели, которая позволила бы быстро рассчитать процесс загрязнения атмосферного воздуха выбросами автотранспорта. Предполагается также создать численную модель, которая давала б возможность прогнозировать уровень загрязнения атмосферного воздуха при использовании защитных барьеров у дороги. **Методика.** Использо-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вана розроблена модель, оснований на урівненні невязкой жидкости и урівненні масопереноса. Урівнення для потенціала швидкості використовується для розрахуноків поля швидкості повітряного потоку при експлуатації бар'єрів. При розв'язанні урівнення для потенціала швидкості застосована неявна різностна схема «умовної апроксимації». Для численного розв'язання задачі масопереноса використовується неявна поперемінно-трикутна різностна схема. Численне інтегрування здійснюється на прямокутній різностній сітці. Для формування складної форми розрахункової області застосовуються маркери. А для моделювання джерела емісії – модель точкового джерела, яка моделюється з допомогою дельта-функції Дірака. **Результати.** Авторами розроблена 2D численна модель, яка враховує основні фізичні фактори, впливаючі на процес розсіювання шкідливих речовин в атмосфері при викидах від автотранспорту з урахуванням розміщення захисних бар'єрів у дороги. На основі побудованих численних моделей проведено вичислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення повітряного середовища на вулиці. **Наукова новизна.** Створена численна модель, яка дозволяє розрахувати 2D аеродинаміку вітрового потоку в умовах наявності перешкод і процес масопереноса викидів токсичних газів від автотраси. Модель дозволяє враховувати наявність автомобіля на дорозі, форму захисного бар'єра, наявність бордюра. Виконані розрахунки по визначенню зони забруднення, формуючої у захисного бар'єра, який розташований у автомагістралі. **Практична значимість.** Розглянута ефективна численна модель, яка може бути застосована при розробці заходів по захисті навколишнього середовища при експлуатації автомобільного транспорту в місті. Розроблена модель дозволяє оцінити розміри, форму і інтенсивність зони забруднення у автомагістралі.

Ключові слова: забруднення атмосфери; міські вулиці; поширення забруднень; численне моделювання

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Rusakova, T. I., & Kirichenko, P. S. (2014). *Modelirovaniye zagryazneniya atmosferynoy vozduha vybrosami avtotransporta na ulicah gorodov* [Monograph]. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Biliaiev, M. M., Slavinska, O. S., & Kyrychenko, R. V. (2017). Prediction of atmospheric air pollution by emissions of motor transport taking into account the chemical transformation of harmful substances. *Science and Transport Progress*, 3(69), 15-22. doi:10.15802/stp2017/104549
3. Biliaiev, M. M., & Rusakova, T. I. (2013). CFD prediction of air pollution in the streets. *Ecology and Nature Management*, 17, 188-194.
4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
5. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka.
6. Düring, I., Bächlin, W., Ketzel, M., Baum, A., Friedrich, U., & Wurzler, S. (2011). A new simplified NO/NO₂ conversion model under consideration of direct NO₂-emissions. *Meteorologische Zeitschrift*, 20 (1), 67-73. doi:10.1127/0941-2948/2011/0491
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi:10.15802/stp2016/60953
8. Nguyen, T. N., Nguyen, T. C., & Nguyen, V. T. (2015). Numerical simulation of wind flow and pollution transport in urban street canyons. *Advanced Science and Technology Letters*, 120, 770-777. doi:10.14257/asstl.2015.120.152
9. Chang, C.-H., Lin, J.-S., Cheng, C.-M., & Hong, Y.-S. (2013). Numerical simulations and wind tunnel studies of pollutant dispersion in the urban street canyons with different height arrangements. *Journal of Marine Science and Technology*, 21(2), 119-126.
10. Overman, H. T. J. (2009). *Simulation model for NO_x distributions in a street canyon with air purifying pavement*. (Master thesis). University Twente, Netherlands.

Prof. S. A. Pichugov, Dr. Sc. in Phys.-and-Math. (Ukraine); Prof. S. Z. Polishchuk, D. Sc. (Tech.), (Ukraine) recommended this article to be published

Received: April 10, 2017

Accessed: July 21, 2017