УДК 504.5:629.33
DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250822.7.871

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ НА ПРОМИСЛОВОМУ МАЙДАНЧИКУ ПІД ЧАС ШТИЛЮ

БІЛЯЄВ М. М.[1], *докт. техн. наук, проф.,*
БІЛЯЄВА В. В.[2], *канд. техн. наук, доц.,*
БЕРЛОВ О. В.[3*], *канд. техн. наук, доц.,*
КРАСНЮК А. В.[4], *канд. техн. наук, доц.,*
ЦУРКАН В. В.[5], *асист.*

[1] Кафедра гідравліки та водопостачання, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882
[2] Кафедра аерогідромеханіки та енергомасопереносу, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124
[3*] Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548
[4] Кафедра архітектурного проектування, землеустрою та будівельних матеріалів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 345-26-67, e-mail: deanpcb@pcb.diit.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1400-9992
[5] Кафедра гідравліки та водопостачання, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 273-15-09, e-mail: tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7433-7306

Анотація. ***Постановка проблеми.*** Розглядається задача прогнозування зон хімічного забруднення на промисловому майданчику за несприятливих умов (штиль). Саме за таких метеоумов має місце дуже інтенсивне забруднення повітря робочих зон на промислових майданчиках. Для оперативного прогнозування рівня хімічного забруднення потрібно мати математичні моделі, що дозволяють швидко здійснити такий прогноз. ***Мета роботи*** − розроблення чисельної багатопараметричної моделі та комп'ютерного коду для прогнозування розмірів та інтенсивності областей забруднення повітря на промислових майданчиках, що формуються в умовах штилю. ***Методика.*** Для розрахунку розповсюдження газоподібних домішок використовується тривимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу. Дане рівняння враховує напрям вітру, атмосферну стратифікацію, інтенсивність емісії домішки. Для чисельного інтегрування рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки використовується фізичне розщеплення цього рівняння. Перше рівняння описує конвективний перенос домішки, друге – перенос домішки за рахунок дифузії, третє рівняння описує зміну концентрації домішки внаслідок дії джерела емісії. Далі будуються скінченнорізницеві схеми розщеплення, що дозволяють розв'язати рівняння розщеплення. ***Наукова новизна***. Розроблено ефективну чисельну модель, яка дозволяє прогнозувати інтенсивність та розміри областей забруднення, що формуються за несприятливих метеоумов (штиль). ***Практична значимість.*** На базі побудованої моделі розроблено комп'ютерний код, що дозволяє оперативно проводити серійні розрахунки для визначення областей забруднення повітря на промислових майданчиках в умовах штилю. ***Висновки.*** Побудовано чисельну модель та комп'ютерний код, які дозволяють прогнозувати рівень забруднення повітря в умовах штилю. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: *забруднення атмосфери; чисельне моделювання; промислові викиди; робоча зона; штиль*

NUMERICAL SIMULATION OF AIR POLLUTION AT AN INDUSTRIAL SITE AT THE CALM

BILIAIEV M.M.[1], *Dr. Sc. (Tech.), Prof.,*
BILIAIEVA V.V.[2], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,*
BERLOV O.V. [3*], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,*
KRASNIUK A.V.[4], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,*
TSURKAN V.V.[5], *Assist.*

[1] Department of Hydraulics and Water Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

[2] Department of Aerohydrodynamics and Energy Mass-transfer, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharina Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2399-3124
[3*] Department of Life Safety, Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Chernyshevskoho Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548
[4] Department of Architectural Design, Landscaping and Building Materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (097) 345-26-67, e-mail: deanpcb@pcb.diit.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1400-9992
[5] Department of Hydraulics and Water Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: tsurkanvaleri1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7433-7306

Abstract. ***Problem statement.*** The task of forecasting zones of chemical pollution at an industrial site under unfavorable conditions − calm is under consideration. It is under such weather conditions that there is very intense air pollution in working areas at industrial sites. In order to quickly predict the level of chemical pollution, you need to have mathematical models that allow you to quickly make such a forecast. ***The purpose of the article.*** Development of a numerical multi-parameter model and computer code for predicting the size and intensity of air pollution areas at industrial sites formed in calm conditions. ***Methodology.*** The three-dimensional equation of convective-diffusion transport is used to calculate the spread of gaseous impurities. This equation takes into account the direction of the wind, atmospheric stratification, and the intensity of the impurity emission. For the numerical integration of the equation of convective-diffusion transport of impurities, the physical splitting of this equation is used. The first equation describes the convective transport of the impurity, the second equation – the transport of the impurity due to diffusion, the third equation describes the change in concentration of the impurity due to the action of the emission source. Next, finite-difference splitting schemes are constructed, which allow solving the splitting equation. ***Scientific novelty.*** An effective numerical model has been developed that allows you to predict the intensity and size of pollution areas that are formed during adverse weather conditions − calm. ***Practical significance.*** On the basis of the built model, a computer code was developed, which allows to quickly carry out serial calculations to determine areas of air pollution at industrial sites in calm conditions. ***Conclusions.*** A numerical model and computer code were built that allow forecasting the level of air pollution in calm conditions. The results of the computational experiment are presented.

Keywords: *atmospheric pollution; numerical modeling; industrial emissions; working area; calm*

Постановка проблеми. Прогнозування рівня забруднення повітря під час техногенних викидів − важливе завдання в галузі охорони праці, екологічної безпеки. Для вирішення проблеми використовуються декілька класів моделей. Перший клас – це емпіричні моделі [3], що базуються на обробці даних експерименту та отриманні досить простих розрахункових залежностей. Розрахунок на базі цих моделей не потребує використання комп'ютерів.

Другий клас – аналітичні моделі, що базуються на використанні точного рішення рівняння масопереносу для оцінювання рівня забруднення повітря [1−3]. До нього також належить модель Гаусса [3; 10].

Емпіричні та аналітичні моделі зручні для практичного використання, але мають суттєві обмеження – вони дають розв'язок задачі для дуже спрощених умов. Альтернативою до цих моделей стали CFD моделі, що базуються на чисельному інтегруванні рівнянь аеродинаміки та масопереносу [5; 6; 9; 11]. CFD моделі дозволяють отримати детальну інформацію щодо розмірів, інтенсивності зон забруднення. При цьому є можливість урахувати практично усі важливі параметри, які впливають на утворення зон забруднення. Створення таких моделей − сучасний напрям у світовій науці.

Важливо зазначити, що теоретичне оцінювання рівня забруднення повітря за дії різних техногенних джерел забруднення здійснюється, як правило, для умов конвекції. Але відомо, що під час штилю (несприятливі метеоумови) будуть найбільш великі концентрації домішки [3]. За штилю рух повітря дуже незначний, що не дає можливості шлейфу забруднювальних речовин інтенсивно розсіюватися в повітрі. Це спричинює формування областей забруднення з дуже значною концентрацією домішки.

Тому для практики дуже важливо мати методи оперативного оцінювання рівня забруднення повітря на промислових майданчиках за несприятливих метеоумов. Нижче розглядається побудова чисельної моделі для розв'язання такої задачі.

Мета статті − розроблення чисельної моделі для експрес-оцінювання рівня

забруднення повітря на промисловому майданчику за штилю.

Методика. Для дослідження процесу формування зон забруднення в умовах штилю на території промислового майданчика застосовується метод математичного моделювання: здійснюється побудова чисельної тривимірної моделі поширення домішки в атмосферному повітрі.

Для моделювання процесу поширення домішки під час викидів із джерел, що розташовані на території ТЕС, в умовах штилю застосовується таке рівняння масопереносу газової домішки [3−6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial wC}{\partial z}=$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+$$
$$+\sum Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right),$$

де C – концентрація домішки в повітрі; μ_x,μ_y,μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії (конкретне значення цих коефіцієнтів відповідає умовам штилю або інверсії [3]); Q – інтесивність викиду домішки від джерел забруднення; $\delta\left(x-x_i\right),\delta\left(y-y_i\right),\delta\left(z-z_i\right)$ – дельта-функція Дірака; x_i,y_i,z_i – декартові координати джерела викиду; t – час.

Крайові умови для моделювального рівняння розглянуті в [4−6].

Для моделювання поширення домішки в повітрі промислового майданчика для умов штилю використовуються такі залежності [3]:

$$\mu_z=\mu_1\varphi_1\left(z\right),$$
$$u_z=u_1\varphi_2\left(z\right),$$
$$\mu_y=ku,\ \mu_x=ku,$$

де $k=0{,}1$; φ_1,φ_2 – спеціальні функції [3]; u_1 – швидкість вітру на висоті 10 м; μ_1 – значення коефіцієнта дифузії на висоті 1 м.

Таким чином, для моделювання концентраційних полів домішки на промисловому майданчику в умовах штилю потрібно знайти розв'язок тривимірного рівняння масопереносу при відповідних залежностях для профілю швидкості та вертикального коефіцієнта дифузії. Розв'язок даної задачі можливо отримати лише чисельним шляхом.

Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу здійснювалося його розщеплення на послідовність рівнянь, що описують лише один процес поширення домішки в робочих зонах [4−6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial wC}{\partial z}=0;$$

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

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\sum Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right).$$

Далі для чисельного інтегрування першого рівняння цієї системи використовувалася така різницева схема розщеплення:

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{i,j}^k-C_{i,j}^n}{\Delta t}+L_x^+C^k+L_y^+C^k+L_z^+C^k=0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння виглядає так:

$$\frac{C_{i,j}^{n+1}-C_{i,j}^k}{\Delta t}+L_x^-C^{n+1}+L_y^-C^{n+1}+L_z^-C^{n+1}=0.$$

Значення різницевих операторів L_x^+,L_x^-, L_y^+ наведені в [4].

Невідоме значення концентрації домішки в кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування другого рівняння системи використовується двоетапна різницева схема розщеплення [7]:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}-C_{i,j,k}^{n}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right]+$$

$$+\left[\mu_y\frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right]+\left[\mu_z\frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}+C_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2}\right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1}-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t}=\left[\mu_x\frac{-C_{i+1,j,k}^{n+1}+C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}\right]+$$

$$+\left[\mu_y\frac{C_{i,j+1,k}^{n+1}-C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2}\right]+\left[\mu_z\frac{C_{i,j,k+1}^{n+1}-C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2}\right].$$

Невідоме значення концентрації домішки визначається із цих залежностей за явною формулою.

Для чисельного інтегрування останнього рівняння системи застосовується метод Ейлера [4]. Розрахункова залежність має вигляд:

$$C_{i,j,k}^{n+1}=C_{i,j,k}^{n}+\Delta t\sum Q_i\delta\left(x-x_i\right)\delta\left(y-y_i\right)\delta\left(z-z_i\right).$$

Таким чином, для розрахунку концентраційних полів домішки послідовно розв'язуються наведені різницеві рівняння.

На базі розробленої чисельної моделі створено код «CALM-3», мова програмування – FORTRAN. До складу коду входять:

– Ca.DAT – файл початкових даних;

– CA2 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку 3D концентраційного поля домішки в області дослідження під час руху повітряних мас;

– CA4 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для розрахунку 3D концентраційного поля домішки внаслідок дії процесу дифузії;

– CA5 – підпрограма типу «SUBROUTINE» для визначення зміни значення концентрації домішки за дії джерела забруднення.

Результати. Наведено результати розв'язання модельної задачі на базі розробленої чисельної моделі. Перший сценарій – визначення рівня забруднення повітря на промисловому майданчику Придніпровської ТЕС за штилю. Другий сценарій – викид від двох труб на території ТЕС під час штилю. Дані для моделювання: швидкість вітру $V_1=0{,}1$ м/с, напрям вітру – південно-східний; $\varphi_1(z)=z, \varphi_2(z)=z^z$; $n=0{,}1$; $k=0{,}1$ [3]; розміри розрахункової області 850 × 550 × 200 м. Нижче на рисунках показано область забруднення (поле концентрації SO_2, рівень z = 1,7 м) для кожного сценарію.

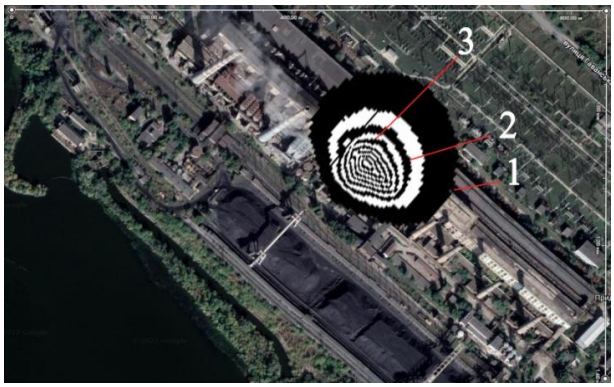

Рис. 1. Область забруднення під час штилю, сценарій № 1: 1 – C = 54 мг/м³; 2 – C = 81 мг/м³; 3 – C = 86 мг/м³ (Google Image, 2022)

Як можна бачити з рисунка 1, під час штилю область забруднення близька до форми «кола» та покриває значну частину промислового майданчика. Значення концентрації SO_2 сильно перевищує ГДК – 10 мг/м³. Часткова деформація форми області забруднення має місце за рахунок невеликої швидкості повітря.

На рисунку 2 показано зону забруднення під час штилю для другого сценарію (викид із двох труб).

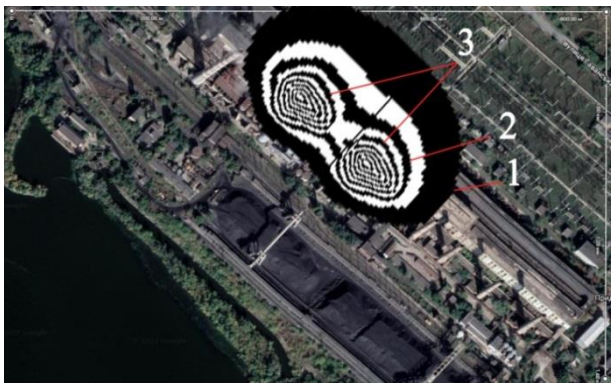

Рис. 2. Область забруднення під час штилю, сценарій № 2: 1 – C = 68 мг/м³; 2 – C = 161 мг/м³; 3 – C = 170 мг/м³(Google Image, 2022)

Якщо порівняти цю область з областю забруднення на рисунку 1 (викид з однієї труби), можна побачити, що для другого сценарію форма області забруднення відрізняється від «кола» внаслідок взаємовпливу двох викидів. Це викликає формування області забруднення за типом «гантелі». Чітко можна бачити два локальні максимуми, що відповідають розташуванню джерел забруднення на промисловому майданчику.

В таблиці показано зміну концентрації домішки на висоті 1,7 м та різної довжини від джерела викиду (перший сценарій) та вздовж центральної лінії, що розташована між двома джерелами викиду.

Таблиця

Зміна концентрації домішки на промисловому майданчику під час штилю

Довжина, м	Концентрація SO_2/перевищення ГДК (сценарій №1)	Концентрація SO_2/перевищення ГДК (сценарій №2)
4	88,4 мг/м^3 / 8,8	177,1 мг/м^3 / 17
10	88,2 мг/м^3 / 8,2	176,3 мг/м^3 / 17
16	87,7 мг/м^3 / 8,7	174,7 мг/м^3 / 17

Таким чином, розроблена чисельна модель дозволяє визначати форму та інтенсивність зон хімічного забруднення, що формуються на промисловому майданчику під час штилю. Зазначимо, що час розрахунку складає 4 с.

Наукова новизна та практична цінність. Наведено чисельна модель та експрес-оцінювання рівня забруднення території промислових майданчиків в умовах техногенних викидів за штилю. Розрахунок на базі побудованої чисельної моделі триває декілька секунд, що дає можливість її широкого використання під час проведення серійних розрахунків з метою визначення розмірів зон небезпечного забруднення повітря.

Висновки.

1. Розроблено чисельну модель, що дозволяє оцінювати форму, розміри зон хімічного забруднення повітря на промислових майданчиках для несприятливих метеоумов (штиль).

2. Запропонована чисельна модель належить до групи кінематичних моделей та дає можливість дуже швидко визначати зони забруднення на комп'ютерах малої та середньої потужності.

3. Запропонована чисельна модель може також бути корисна для оцінювання рівня небезпеки на території підприємств у випадку екстремальних ситуацій – аварійний розлив хімічно небезпечної речовини тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.

2. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 6. С. 1–4.

3. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. 273 с.

4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.

5. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.

6. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях : монография. Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2011. 166 с.

7. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.

8. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train. *East European Scientific Journal.* № 3 (43). 2019. Pp. 10–15.

9. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transport Problems*. Vol. 16 (2), part 1. 2021. Pp. 73–86. URL: https://doi.org/10.21307/tp-2021-024.

10. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life*. № 9. 2018. Pp. 38–45.

11. Jeong S. J. A CFD Study of Roadside Barrier Impact on the Dispersion of Road Air Pollution. *Asian Journal of Atmospheric Environment*. № 9 (1). 2015. Pp. 22–30. URL: http://asianjae.org/xml/19504/19504.pdf

REFERENCES

1. Basmanov A.Ye. and Govalenkov S.S. *Ocenka koncentracyi opasnux xymycheskyx veshhestv v vozduxe pry nepreruvnoj aktyvnosty istochnyka* [Estimation of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous source activity]. *Problemy nadzvychajnyx sytuacij* [Problems of emergency situations]. Vol. 12, 2010, pp. 21–27. (in Russian).

2. Plyatsuk L.D. and Boyko V.V. *Analiz metodiv matematychnogo modelyuvannya rozpovsyudzhennya zabrudnyuyuchyx rechovyn v atmosferi* [Analysis of methods of mathematical modeling of the spread of pollutants in the atmosphere]. *Visnyk KNU im. Myxajla Ostrogradskogo* [Problems of Emergency Situations]. Vol. 6, 2010, pp. 1–4. (in Ukrainian).

3. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulyrovanye zagryaznenyya atmosferu* [Forecasting and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1985, 273 p. (in Russian).

4. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K and Belyaev N.N. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modeling of pollution spreading in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).

5. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow : Nauka Publ., 1982, 320 p. (in Russian).

6. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennyh avariyah : monografiya* [Modeling of atmospheric pollution during technogenic accidents : monograph]. Dnipropetrovsk : Nova Ideologiya Publ., 2011, 166 p. (in Russian).

7. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., 1983, 616 p. (in Russian).

8. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A. and Oladipo M.O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train. East European Scientific Journal. No. 3 (43), 2019, pp. 10–15.

9. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V. and Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. Transport Problems. Vol. 16 (2), part 1, 2021, pp. 73–86. URL: https://doi.org/10.21307/tp-2021-024.

10. Ilic P., Ilic S. and Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. Quality of Life. Vol. 9, 2018, pp. 38–45.

11. Jeong S.J. A CFD Study of Roadside Barrier Impact on the Dispersion of Road Air Pollution. Asian Journal of Atmospheric Environment. No. 9 (1), 2015, pp. 22–30. URL: http://asianjae.org/xml/19504/19504.pdf.

Надійшла до редакції: 01.08.2022.