

УДК 519.6:504.054:656.2

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.42.929

ЕКСПРЕС-РОЗРАХУНОК ЗАБРУДНЕННЯ РОБОЧИХ ЗОН БІЛЯ ТРАНСПОРТНОГО КОРИДОРУ У ВИПАДКУ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ НА ЗАЛІЗНИЦІ

БІЛЯЄВА В. В.¹, канд. техн. наук, доц.,

БЕРЛОВ О. В.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,

КОЗАЧИНА В. А.³, канд. техн. наук, доц.,

ТИМОШЕНКО О. А.⁴, канд. техн. наук, доц.,

ПОЛТОРАЦЬКА В. М.⁵, канд. техн. наук, доц.

¹ 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

^{2*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 247-16-01, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, 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: 0000-0002-6894-5532

⁴ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

⁵ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-71, e-mail: poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6244-8439

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається задача експрес-оцінювання областей забруднення атмосферного повітря в робочих зонах біля транспортного коридору в разі екстремальних ситуацій на залізниці, що спричиняють емісію хімічно небезпечних речовин. **Мета роботи** – розроблення чисельної моделі для швидкого аналізу областей забруднення атмосферного повітря в умовах конвекції. **Методика.** Для визначення областей забруднення атмосферного повітря, що формуються при екстремальних ситуаціях на залізниці у випадку емісії хімічно небезпечних речовин, застосовується тривимірне рівняння конвективно-дифузійного розповсюдження домішки в атмосфері. Враховується нерівномірний профіль вітру з висотою та залежність коефіцієнтів атмосферної дифузії від швидкості вітру. Для чисельного розв'язання тривимірного рівняння масопереносу домішки в атмосферному повітрі застосовуються скінченорізницеві схеми розщеплення. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну чисельну модель для визначення областей забруднення повітря біля транспортного коридору у випадку викиду хімічно небезпечних речовин на залізниці. **Практична значущість.** На базі побудованої чисельної моделі розроблено комп'ютерну програму, що дозволяє оперативно розраховувати динаміку формування областей хімічного забруднення біля транспортного коридору в разі екстремальних ситуацій на залізниці. **Висновки.** Розроблено чисельна модель та комп'ютерний код, що дозволяють методом обчислювального експерименту оцінювати забруднення робочих зон біля транспортного коридору у випадку екстремальних ситуацій на залізниці. Побудована модель має широкий робочий діапазон та враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на формування зон хімічного забруднення в повітрі. Наведено результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: екстремальна ситуація; забруднення атмосфери; чисельне моделювання; залізниця

EXPRESS CALCULATION OF WORKING ZONES' POLLUTION NEAR THE TRANSPORT CORRIDOR DURING EXTREME SITUATIONS ON THE RAILWAY

BILIAIEVA V.V.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

BERLOV O.V.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

KOZACHYNA V.A.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

TYMOSHENKO O.A.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

POLTORATSKA V.M.⁵, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ 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

^{2*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

³ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

⁴ Department of Ecology and Environmental Protection, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

⁵ Department of Ecology and Environmental Protection, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-71, e-mail: poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6244-8439

Abstract. Problem statement. The task of rapid assessment of atmospheric air pollution areas in work zones near the transport corridor during extreme situations on the railway leading to the chemically hazardous substances' emission is considered. **The purpose of the article.** Development of a numerical model for rapid analysis areas of atmospheric air pollution areas under convection conditions. **Methodology.** The three-dimensional equation of the convective-diffusion spread of impurities in the atmosphere is used to determine the atmospheric air pollution areas that are formed during in extreme situations on the railway in the case of chemically hazardous substances' emission. The uneven profile of the wind with height and the dependence of the atmospheric diffusion coefficients on the wind speed are taken into account. For the numerical solution of the three-dimensional mass transfer equation of impurities in atmospheric air, finite-difference splitting schemes are used. **Scientific novelty.** An effective numerical model to determine the areas of air pollution near the transport corridor in case of chemically hazardous substances' emission on the railway is developed. **Practical value.** Based on the constructed numerical model, a computer program was developed, which allows to rapid calculate the dynamics of the formation of chemical pollution areas near the transport corridor during extreme situations on the railway. **Conclusions.** A numerical model and computer code are developed, which allow to evaluate the pollution of working zones near the transport corridor during extreme situations on the railway by the method of a computational experiment. The developed model has a wide working range and takes into account the most significant physical factors affecting the formation of chemical pollution zones in the air. The results of the computational experiment are presented.

Keywords: *extreme situation; atmospheric pollution; numerical simulation; railway*

Постановка проблеми. Залізниця в багатьох країнах світу перевозить в значній кількості небезпечні речовини. Тому екстремальні ситуації на залізниці, наприклад, під час транспортування хімічно небезпечних речовин, можуть спричинити дуже масштабне забруднення навколишнього середовища (рис. 1) та отруєння людей [7]. Дуже актуальним бачиться прогнозування можливих наслідків таких небезпечних ситуацій на транспорті.



Рис. 1. Аварія на залізниці в США під час транспортування хімічно небезпечних речовин, 2023 р. (<http://surl.li/fpmat>)

Аналіз останніх досліджень. Найбільш поширений підхід до аналізу областей хімічного забруднення під час екстремальних ситуацій – це використання моделі Гаусса [9–12], аналітичних моделей масопереносу [2] та моделі ОНД-86 [1; 3]. Такі моделі дозволяють здійснювати серійні розрахунки прогнозних областей забруднення, що дуже важливо для щоденного використання моделей на практиці. Але для застосування цих моделей потрібен ряд емпіричних коефіцієнтів, що потребує їх обґрунтування для конкретного регіону, та моделі, орієнтовані на прогнозування областей забруднення для точкового джерела.

Більш ефективним підходом до розв'язання задач з оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на практиці стало використання чисельних моделей масопереносу домішки в атмосфері. Розроблення моделей даного класу залишається актуальною проблемою в галузі екологічної безпеки та охорони праці.

Мета статті – розроблення швидко-розрахункової чисельної моделі для аналізу та прогнозу областей забруднення, що формуються під час аварійних викидів хімічно небезпечних речовин на залізниці.

Методика. Для прогнозування динаміки хімічного забруднення атмосферного повітря у випадку аварійних викидів на залізниці використовується тривимірне рівняння переносу домішки [3–7]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s)C}{\partial z} =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + (1)$$

$$+ \sum Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)) \delta(z-z_i).$$

Де C – концентрація домішки в атмосферному повітрі, мг/м³; w_s – швидкість гравітаційного осадження домішки, м/с; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії, м²/с; Q – інтенсивність викиду домішки, кг/с; $\delta(x-x_i), \delta(y-y_i), \delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака (задає місце викиду домішки); $x_i(t), y_i(t), z_i$ – декартові координати джерела викиду домішки, м; t – час, с.

Крайові умови для тривимірного рівняння масопереносу розглянуті в [4–7].

Зазначимо, що рівняння (1) являє собою найбільш поширену модель, що використовується для прогнозування рівня хімічного забруднення атмосферного повітря. На базі цієї моделі є можливість здійснити прогнозування областей забруднення, як від точкових джерел (наприклад, викид від пошкодженої цистерни), так і від площадних джерел забруднення (наприклад, зона аварійного розливу, від якої має місце випарювання хімічно небезпечної речовини).

Ця модель дає можливість прогнозувати області забруднення від рухомих джерел емісії (це моделюється заданням закону руху джерела емісії: $x = x_i(t), y = y_i(t)$). Модель також дозволяє враховувати зміну інтенсивності викиду домішки із часом (наприклад, зменшення інтенсивності

викиду домішки від пошкодженої цистерни; це моделюється заданням закону викиду, тобто залежністю, що враховує зміну інтенсивності емісії від часу $Q = Q(t)$.

Крім цього, модель (1) дає можливість прогнозувати динаміку формування областей забруднення атмосфери під час залпових викидів, характерних для екстремальних ситуацій. В даному випадку при постановці крайової задачі задаються форма та розміри початкової хмари токсичної речовини на місці аварії та на базі рівняння (1) розраховується динаміка її руху в атмосферному повітрі.

Для проведення прогнозних розрахунків параметри атмосфери визначаються на базі таких залежностей [3; 4; 6]:

$$u = u_1 \frac{\lg z/z_0}{\lg z_1/z_0},$$

$$\mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m,$$

$$\mu_y = k_0 \cdot u,$$

$$\mu_x = \mu_y,$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті z_1 (приймається швидкість вітру для висоти $z_1 = 10$ м); z_0 – шорсткість поверхні; $k_1 = 0,2; p = 0,16; m \approx 1, k_0 = 0,1$.

Треба зазначити, що пошук розв'язку рівняння (1) для різних екстремальних ситуацій (рух пошкодженої цистерни, аварійний розлив тощо) можливий лише чисельним шляхом.

Чисельна модель. Для чисельного інтегрування рівняння (1) здійснюється його розщеплення на диференціальному рівні таким чином:

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

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w-w_g)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)).$$

Для першого рівняння масопереносу з (2), скінченнорізницева схема записується так [5]:

– крок № 1:

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

– крок № 2:

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

Скінченнорізницева схема для другого рівняння масопереносу записується так:

– крок № 1:

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

– крок № 2:

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

Скінченнорізницева схема для третього рівняння масопереносу запишеться наступним чином:

– крок № 1:

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

– крок № 2:

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

Опис різницевих операторів L_x^+ , L_y^- , M_{xx}^+ та інше, що використані в даних схемах розщеплення, наведено в [5]. Для інтегрування останнього рівняння з (2) застосовується метод Ейлера [8]. Розрахункова залежність має вигляд:

$$C^{n+1} = C^n - dt * \sigma C + dt * \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i).$$

На базі розглянутої чисельної моделі створено код *RaMOD*.

Результати. Нижче наведено результати розв'язання прикладних задач на базі розробленої чисельної моделі. На рисунках 2 та 3 показано зону хімічного забруднення атмосферного повітря під час залпового викиду аміаку з п'ятьох пошкоджених цистерн. Моделюється екстремальна ситуація на залізничній станції «Правда» (м. Кам'янське). Швидкість вітру 11 м/с на висоті 10 м, напрям вітру в бік селитебної зони. Поле концентрації аміаку наведено на рівні $z = 6$ м.

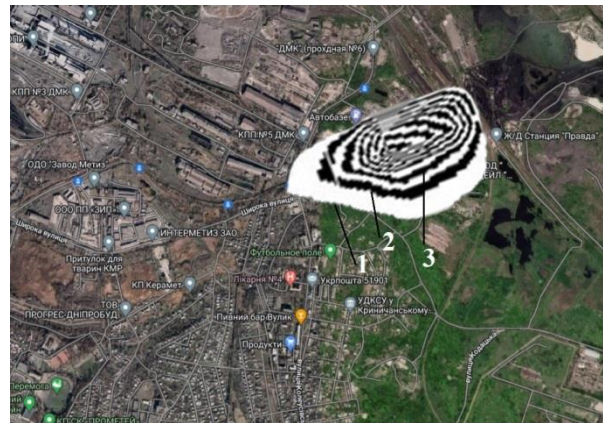


Рис. 2. Ізолінії концентрації аміаку, $t = 2,8$ хв:
1 – $C = 0,8$ г/м³; 2 – $C = 1,9$ г/м³; 3 – $C = 5,2$ г/м³



Рис. 3. Ізолінії концентрації аміаку, $t = 4,7$ хв:
1 – $C = 0,9$ г/м³; 2 – $C = 2,1$ г/м³; 3 – $C = 5,4$ г/м³

Як можна бачити з рисунків 2 та 3, зона забруднення має вигляд деформованого еліпса. Зона забруднення із часом збільшується в розмірах та мігрує в напрямку м. Кам'янське. Звертає на себе увагу дуже інтенсивне забруднення атмосферного повітря – концентрація аміаку значно перевищує ГДК = 20 мг/м³.

На рисунку 4 показано зону хімічного забруднення у випадку аварійного розлиття сірчаної кислоти на залізничній колії

промислового підприємства. Швидкість вітру 6 м/с на висоті $z = 10$ м, зона забруднення наведена для рівня $z = 8$ м.



Рис. 4. Ізолнії концентрації сірчаної кислоти, $t = 3,6$ хв: 1 – $C = 4$ г/м³; 2 – $C = 13$ г/м³; 3 – $C = 28$ г/м³

Як видно з рисунку 4, зона забруднення має вигляд «язика», що видовжується за напрямом вітру та створює загрозу токсичного ураження працівників на підприємстві.

Час розрахунку складає 3 секунди.

Наукова новизна та практична цінність. Побудована чисельна модель та комп'ютерний код дозволяють методом обчислювального експерименту оцінювати забруднення робочих зон біля транспортного коридору в разі екстремальних ситуацій на

залізниці. Модель має широкий робочий діапазон та враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на формування зон хімічного забруднення в повітрі. Результати проведених обчислювальних експериментів показують, що розроблена чисельна модель дає можливість аналізувати області забруднення в повітрі у разі виникнення різноманітних екстремальних ситуацій на залізниці.

Висновки

1. Побудовано ефективну чисельну модель, що дає можливість досліднику, в режимі практично реального часу, визначити області забруднення повітря в робочих зонах біля транспортного коридору у разі виникнення екстремальних ситуацій на залізниці.

2. Розроблена чисельна модель враховує основні фізичні фактори, що визначають форму та інтенсивність областей хімічного забруднення в повітрі: конвективний рух повітряних мас, турбулентну дифузію, інтенсивність та режим емісії хімічно небезпечної речовини, рух джерела забруднення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Соботович Е. В., Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л. та ін. Аварія з фосфором у Львівській області : факти, проблеми, екологічні наслідки. *Вісник Інституту геохімії навколишнього середовища*. 2007. Вип. 14. С. 8–18.
2. Басманов А. Е., Говаленков С. С. Оценка концентрации опасных химических веществ в воздухе при непрерывной активности источника. *Проблемы надзвичайних ситуацій*. 2010. Вип. 12. С. 21–27.
3. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеоздат, 1985. 273 с.
4. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
5. Згуровський М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляєв Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наук.думка, 1997. 368 с.
6. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
7. Пшинько А. Н., Беляєв Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 166 с.
8. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
9. Bashar M. Al-Zghoul, Wa'il Y. Abu-El-Sha'r. New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*. Vol. 20. 2020. Pp. 119–127.
10. Ilic P., Ilic S., 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. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlavka, Jan Bitta. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*. 2015. Vol. 2. Pp. 1–8.
12. Tseng J. M., Su T. S., Kuo C. Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 45. Pp. 384–392.

REFERENCES

1. Sobotovych E.V., Lysychenko G.V. and Zabolonov Yu.L. *Avariya z fosforom u L'vivs'kij oblasti : fakty, problemy, ekolohichni naslidky* [Accident with phosphorus in Lviv region: facts, problems, ecological consequences]. *Visnyk*

Institutu heokhimiyi navkolyshn'oho seredovyscha [Bulletin of the Institute of Environmental Geochemistry]. Vol. 14, 2007, pp. 8–18. (in Ukrainian).

2. Basmanov A.E. and Govalenkov S.S. *Ocenka koncentraciy opasnux xymicheskix veshhestv v vozduxe pry neprerivnoj aktivnosti istochnyka* [Estimation of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous source activity]. *Problemy nadzvychnykh situacij* [Problems of emergency situations]. Vol. 12, 2010, pp. 21–27. (in Russian).

3. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecasting and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad : Gidrometeoizdat Publ., 1985, 273 p. (in Russian).

4. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kozachyna V.A. *CFD modelyuvannya v analizi efektyvnosti system захystu dovkillya ta pracivnykiv na robochyx misyax : monografiya* [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of the environmental protection system and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2022, 268 p. (in Ukrainian).

5. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1997, 368 p. (in Russian).

6. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow : Nauka Publ., 1982, 320 p. (in Russian).

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

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

9. Bashar M. Al-Zghoul and Wa'il Y. Abu-El-Sha'r. New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*. Vol. 20, 2020, pp. 119–127.

10. Ilic P., Ilic S., 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. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlavka and Jan Bitta. (). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*. Vol. 2, 2015, pp. 1–8.

12. Tseng J. M., Su T. S. & Kuo C. Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering*. 2012, vol. 45, pp. 384–392.

Надійшла до редакції: 17.03.2023.