

УДК 519.6:504.3.054

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.14.907

РОЗРАХУНОК ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У ВИПАДКУ РОЗЛИТТЯ ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНОЇ РЕЧОВИНИ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
БІЛЯЄВА В. В.², *канд. техн. наук, доц.*,
БЕРЛОВ О. В.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*,
МАШИХІНА П. Б.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
ЯКУБОВСЬКА З. М., *канд. техн. наук, доц.*

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: diit.hydro.eco@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. 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

⁴ Кафедра гідравліки та водопостачання, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 73-15-09, e-mail: gidro_eko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

⁵ Кафедра енергетики, Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 753-56-38, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9893-3479

Анотація. *Постановка проблеми.* Розглядається задача прогнозування областей хімічного забруднення на промисловому майданчику при інверсії в атмосфері та випарюванні хімічно небезпечної речовини від зони розлиття. *Мета роботи* – розроблення методу розрахунку інтенсивності, форми областей забруднення в атмосфері, що формуються в умовах інверсії. *Методологія.* Для розрахунку поширення хімічно небезпечних речовин в атмосфері в умовах інверсії використовується тривимірне рівняння переносу домішки сумісно з підходом М. Берлянда, щодо визначення величини вертикального коефіцієнта дифузії для такої несприятливої метеумови. Чисельне інтегрування рівняння переносу домішки здійснюється за допомогою двох скінченнорізницевих схем. Обидві схеми базуються на використанні методу розщеплення. *Результати.* Запропонований ефективний метод розрахунку областей забруднення атмосфери, що формуються при випарюванні хімічно небезпечної речовини від зони розлиття. Розроблена комп'ютерна програма, дає можливість швидко визначати ці зони забруднення атмосфери в умовах інверсії. Наведено результати обчислювального експерименту. *Наукова новизна.* Розроблено метод, що дозволяє оцінювати розміри та інтенсивність зон хімічного забруднення, які формуються в атмосфері при інверсії та випарюванні речовини від зони розлиття. *Практична цінність.* На базі розробленого методу створено програму для проведення обчислювального експерименту з оцінювання зон забруднення атмосфери на промислових майданчиках при аварійних розливах хімічно небезпечних речовин.

Ключові слова: аварійне розлиття; забруднення атмосфери; інверсія; математичне моделювання

CALCULATION OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTION IN CASE OF CHEMICALLY DANGEROUS SUBSTANCE SPILL

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.*,
MASHYKHINA P.B.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
YAKUBOVSKA Z.M.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Hydraulics and Water Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 273-15-09, e-mail: diit.hydro.eco@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, 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@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

⁴Department of Hydraulics and Water Supply, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (0562) 73-15-09, e-mail: gidro_eko@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-3057-9204

⁵Department of Power Engineering, Ukrainian State University of Chemical Technology, 8, Haharina Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-56-38, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9893-3479

Abstract. Problem statement. The task of forecasting for chemical pollution areas at the industrial site during atmospheric inversion and chemically hazardous substance evaporation from the spill zone is considered. The purpose of the work is to develop a method for calculating the intensity and shape of pollution areas in the atmosphere that are formed under inversion conditions. **Methodology.** The three-dimensional impurity transport equation is used to calculate the atmospheric spread of chemically hazardous substances under inversion conditions, together with the M. Berland's approach, to determine the vertical diffusion coefficient for this adverse meteorological condition. Numerical integration of the impurity transfer equation is realised using two finite-difference schemes. Both schemes are based on the splitting method. **Results.** An effective calculating method of atmospheric pollution areas formed during the evaporation of a chemically hazardous substance from the spill zone is proposed. A computer code to allow quick determination of these atmospheric pollution zones under inversion conditions is developed. The results of the computational experiment are presented. **Scientific novelty.** A method is developed to assess the size and intensity of chemical pollution zones formed in the atmosphere during inversion and evaporation of the substance from the spill area. **Practical value.** Based on the developed method, a code for a computational experiment to assess atmospheric pollution zones at industrial sites during emergency spills of chemically hazardous substances is generated.

Keywords: *emergency spill; atmospheric pollution; inversion; mathematical modelling*

Вступ. На підприємствах, де використовуються, зберігаються хімічно небезпечні речовини, виникає важлива задача – прогнозування зон аварійного забруднення атмосферного повітря у випадку екстремальної ситуації, що може трапитися під час транспортування речовин, аварійної емісії в сховищах тощо [1; 6; 9]. Використання для цієї мети моделі ОНД-86 [2] не зовсім доцільне, тому що вона розроблялася для умов організованих викидів на підприємствах. Крім того, ця модель не дозволяє зробити прогноз для аномальних метеоумов типу інверсія. Більш сучасним підходом до розв'язання задач прогнозування зон хімічного зараження в разі екстремальних ситуацій стало використання моделей Гаусса [8; 10–12].

Але моделі даного класу базуються на застосуванні ряду емпіричних параметрів, що були визначені для території США, Англії. Тому їх використання в інших регіонах потребує наукового обґрунтування. Отож, актуальним залишається створення швидко розрахункових математичних моделей, що дозволяють визначити зони хімічного зараження у випадках екстремальних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах.

Мета дослідження – розроблення розрахункового методу, що дозволяє

визначити форму, інтенсивність, розміри зон забруднення атмосфери в умовах інверсії у випадку випарювання хімічно небезпечної речовини від зони аварійного розлиття.

Методологія. Розглядається розробка математичної моделі для оцінювання зон хімічного зараження у випадку аварійного розлиття сірчаної кислоти на промисловому майданчику Придніпровської ТЕС. Прогнозування здійснюється для умов інверсії. Відомо, що ця кислота потрапляє в залізничних цистернах до Придніпровської ТЕС та використовується для регенерації фільтрів у системі водокористування. У випадку аварії на колії можливе масштабне забруднення ґрунту та внаслідок випарювання кислоти – забруднення атмосферного повітря на промисловому майданчику.

Теоретична частина. Аналіз інтенсивності забруднення атмосфери у разі випарювання хімічно небезпечної речовини від поверхні аварійного розлиття здійснюється на базі рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки [2–4]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ & + \sum Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i), \end{aligned} \quad (1)$$

де C – концентрація хімічно небезпечної речовини в повітрі, мг/м³; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти атмосферної дифузії, м²/с; Q – інтенсивність випарювання хімічно небезпечної речовини від зони аварійного розлиття, мг/с; $\delta(x-x_i), \delta(y-y_i), \delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака; x_i, y_i, z_i – декартові координати джерела емісії, м; t – час, с.

Зауважимо, що конкретне значення коефіцієнтів дифузії відповідає різним метеоситуаціям (різним умовам стабільності атмосфери) [2]. Поверхня випарювання моделюється набором точкових джерел. Інтенсивність емісії парів кислоти від зони розлиття розраховується на базі емпіричної залежності [5]:

$$Q_w = (5,83 + 4,1V) P_H \sqrt{M}, \quad (2)$$

де Q_w – кількість кислоти, що випаровується (грам/м²/год.); V – локальна швидкість повітря біля вільної поверхні зони розлиття; P_H – тиск насиченої пари; M – молекулярна маса кислоти.

Постановка крайових умов для рівняння (1) розглядається в [3; 4].

Для моделювання процесу формування зони хімічного забруднення в умовах інверсії застосовується підхід проф. М. Е. Берлянда, згідно з яким використовується така формула для розрахунку вертикального коефіцієнта дифузії [2]:

$$\mu_z = \mu_1 \cdot \left(1 - \frac{z - z_i}{L_i}\right)^2, \quad (3)$$

де z_i – нижня межа інверсії; L_i – спеціальна функція, що враховує енергію турбулентності [2]; z – поточне значення висоти над поверхнею землі. Таким чином, змінюючи значення параметра z_i , можна

моделювати забруднення атмосферного повітря за різних розмірів шару інверсії.

Для визначення величини інших коефіцієнтів дифузії використовуються такі формули [2; 4]:

$$\mu_x = ku, \quad \mu_y = kv,$$

де u, v – компоненти вектора швидкості вітру в проєкціях на вісь x, y відповідно; k – емпіричний параметр [3].

Зазначимо, що розв'язання поставленої крайової задачі можна отримати лише чисельним шляхом.

Чисельна модель. Для чисельного інтегрування рівняння (1) використовувалися дві скінченнорізницеві схеми. Перша схема будується для систем рівнянь наступного вигляду:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = 0; \\ & \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \\ & \frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i \delta(x-x_i) \delta(y-y_i) \delta(z-z_i). \end{aligned}$$

Ці рівняння отримані шляхом фізичного розщеплення базового рівняння (1). Далі, для чисельного інтегрування першого рівняння цієї системи використовувалася така різницева схема розщеплення:

$$\text{– на першому кроці } (k = \frac{1}{2}) \text{ різницева}$$

рівняння має вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницева рівняння має вигляд:

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

Значення різницевих операторів L_x^+ , L_x^- , L_y^+ ... наведені в [3].

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]:

$$\begin{aligned} \frac{C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} &= \left[\mu_x \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \\ &+ \left[\mu_y \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[\mu_z \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right], \\ \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} &= \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \\ &+ \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[\mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right]. \end{aligned}$$

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

Для чисельного інтегрування останнього рівняння системи застосовується метод Ейлера [7]. Розрахункова залежність має вигляд:

$$C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^n + \Delta t \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i).$$

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

Друга різницева схема використовується для наступної системи рівнянь.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right); \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i).$$

Для чисельного розв'язання рівняння (4) цієї системи застосовується наступна двокрокова схема розщеплення:

– на першому кроці використовується залежність:

$$\begin{aligned} C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= C_{i,j,k}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \\ &+ \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \\ &+ \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j,k}^n + C_{i+1,j,k}^n}{2\Delta x^2}, \end{aligned}$$

– на другому кроці використовується залежність:

$$\begin{aligned} C_{i,j,k}^{n+1} &= C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} + \\ &+ \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \\ &+ \Delta t \mu_x \frac{-C_{i,j,k}^{n+1} + C_{i+1,j,k}^{n+1}}{2\Delta x^2}, \end{aligned}$$

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

Для чисельного розв'язання рівняння (5) застосовується наступна двокрокова локально-одновимірна схема розщеплення:

– на першому кроці використовується залежність:

$$\begin{aligned} C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} &= C_{i,j,k}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \\ &+ \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \\ &+ \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j,k}^n + C_{i,j+1,k}^n}{2\Delta y^2}, \end{aligned}$$

– на другому кроці використовується залежність:

$$C_{i,j,k}^{n+1} = C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} +$$

$$+ \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} +$$

$$+ \Delta t \mu_y \frac{-C_{i,j,k}^{n+1} + C_{i,j+1,k}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

де $v^+ = \frac{v+|v|}{2}, v^- = \frac{v-|v|}{2}$.

Аналогічно будується локально-одновимірною різницевою схемою для рівняння (6). Для чисельного інтегрування останнього рівняння системи застосовується метод Ейлера [7].

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

На базі розроблених чисельних моделей створено код «INVER-21» мовою програмування FORTRAN.

Результати. Нижче наведено результати розв’язання задачі з визначення рівня забруднення повітря на промисловому майданчику Придніпровської ТЕС при інверсії та у випадку аварійного розлиття сірчаної кислоти. Розглядається розлиття кислоти біля залізничної колії (рис. 1).

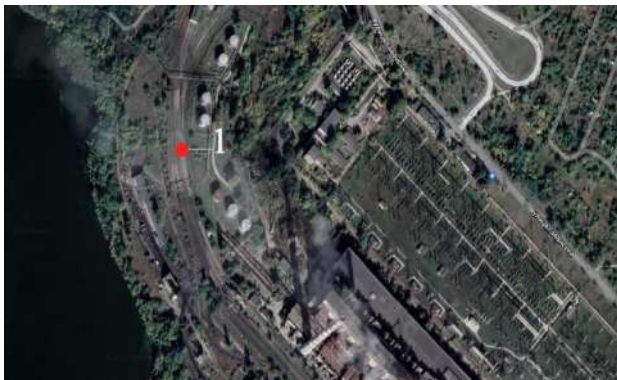


Рис. 1. Розрахункова область:
1 – зона аварійного розливу (Google Image, 2022)

Дані для прогнозування: розміри розрахункової області $1\,000 \times 550 \times 270$ м; швидкість вітру $1,6$ м/с; $z_i = 1,3$ м, $L_i = 100$ м [2]; $\mu_1 = 0,03$ м/с, $\mu_x = 1,1$ м²/с, $\mu_y = 1,1$ м²/с; площа зони аварійного розлиття приймається 700 м².

Проведений обчислювальний експеримент показав «стійкість» розроблених чисельних моделей при розрахунку процесу масопереносу в області складної геометричної форми. Час розрахунку складає 15 с.

Область хімічного забруднення промислового майданчика показана на рисунку 2 (рівень $1,6$ м).



Рис. 2. Область хімічного забруднення на промисловому майданчику при інверсії, аварійне розлиття: 1 – $C = 0,05$ мг/м³; 2 – $C = 0,13$ мг/м³; 3 – $C = 0,26$ мг/м³; (Google Image, 2022)

Як можна бачити з рисунка 2, область забруднення покриває значну частину промислового майданчика біля залізничної колії. Форма області забруднення має вигляд «еліпса», що витягується в напрямі вітру. Зміна концентрації домішки на висоті $1,6$ м на різній довжині від області аварійного розлиття показана в таблиці.

Таблиця

Зміна концентрації домішки на промисловому майданчику за штилю

Довжина x, м	Концентрація домішки/перевищення ГДК
2	2,7 мг/м ³ /2,7
3	1,9 мг/м ³ /1,9
4	1,6 мг/м ³ /1,6

Як можна бачити з таблиці, має місце небезпечне забруднення промислового майданчика біля зони розлиття та перевищення концентрації домішки ГДК = 1 мг.

Зазначимо, що час розрахунку складає 4 с.

Наукова новизна та практична цінність. Розроблено метод прогнозування розмірів та інтенсивності зон хімічного зараження атмосфери в умовах інверсії при випарюванні хімічно небезпечної речовини від зони аварійного розлиття. Метод розрахунку базується на створенні чисельної моделі розповсюдження домішки від точкових джерел емісії.

Практичне застосування методу дозволяє швидко визначити зону забруднення, що цінно під час серійних розрахунків для створення бази даних щодо визначення можливих зон ризику на хімічно небезпечних об'єктах у разі аварійних розлиттів, які можуть мати місце в несприятливих метеоумовах.

Висновки. 1. Розроблено метод визначення розмірів, інтенсивності зон хімічного зараження при випарюванні хімічно небезпечної речовини від зони аварійного розлиття. Метод орієнтований на оцінювання зон забруднення, що формуються в умовах інверсії.

2. Розроблений метод прогнозу зон хімічного зараження враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на поширення хімічно небезпечних речовин в атмосфері.

3. Запропонована чисельна модель може також бути корисна для оцінювання рівня небезпеки на території підприємств у випадку екстремальних ситуацій – аварійного розлиття 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. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
3. 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.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
5. Мацак В. Г., Хоцянов Л. Г. Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве. Москва : Медгиз, 1959. 231 с.
6. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 166 с.
7. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
8. 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*. 2020. Vol. 20. Pp 119–127.
9. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Калашніков І. В. Математичне моделювання затікання токсичного газу у приміщення при аварії на промисловому майданчику. *Математичне моделювання*. 2018. № 2 (39). С. 95–101.
10. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool – ALOHA Software. *Quality of Life. Publication in Natural Sciences*. 2018. № 8 (2). 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. Basmanov A. Ye. and Govalenkov S. S. *Otsenka kontsentratsii opasnykh khimicheskikh veshchestv v vozdukhу pri nepreryvnoy aktivnosti istochnika* [Estimation of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous source activity]. *Problemi nadzvichaynykh situatsiy* [Problems of Emergency Situations]. 2010, no. 12, pp. 21–27. (in Russian).
2. Berlyand M. Ye. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecasting and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad : Gidrometeoizdat Publ., 1985, 273 p. (in Russian).

3. 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).

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

5. Matsak V.G. and Khotsyanov L.G. *Gigienicheskoe znachenie skorosti ispareniya i davleniya para toksicheskikh veshchestv, primenyaemykh v proizvodstve* [Hygienic significance of the evaporation rate and vapor pressure of toxic substances used in production]. Moscow : Medgiz Publ., 1959, 231 p. (in Russian).

6. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennykh avariayah* [Modeling of atmospheric pollution during technogenic accidents]. 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. 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. 2020, no. 20, pp. 119–127.

9. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kalashnikov I. V. *Matematychni modelyuvannya zatikannya toksychnoho hazu u prymishchennya pry avariyi na promyslovomu maydanchyku* [Mathematical modeling of toxic gas leakage into the premises during an accident on an industrial site]. *Matematychni modelyuvannya* [Mathematical Modeling]. 2018, no. 2 (39), pp. 95–101. (in Ukrainian).

10. Danijela Ilić Komatina, Jovana Galjak and Svetlana Belošević. Simulation of chemical accidents with acetylene in “messer tehnogas” kraljevo plant by “aloha” software program. Publication in Natural Sciences. 2018, no. 8 (2), pp. 38–45. URL: <https://doi:10.5937/univtho8-18014>.

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. 2015, no. 2, pp. 1–8.

12. Tseng J.M., Su T.S. and Kuo C.Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. Procedia Engineering. 2012, no. 45, pp. 384–392.

Надійшла до редакції: 12.11.2022.