

УДК 519.6:504.054:620.9

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.22.1003

## КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЗОН ЗАБРУДНЕННЯ ЗА ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЙ НА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

БІЛЯЄВА В. В.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
КАЛАШНИКОВ І. В.<sup>2</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
БЕРЛОВ О. В.<sup>3\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
КОЗАЧИНА В. А.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ТИМОШЕНКО О. А.<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1</sup> Кафедра енергетичних систем та енергоменеджменту, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374 98 22, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>2</sup> Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» акціонерного товариства «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, 61052, Харків, Україна, тел. +38 (057) 724-41-25, e-mail: [uzp38@ukr.net](mailto:uzp38@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

<sup>3\*</sup> 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](mailto:berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup> 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](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup> 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: [tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua](mailto:tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

**Анотація.** *Постановка проблеми.* Розглядається задача прогнозування зон ураження за різних видів техногенного навантаження у випадку виникнення екстремальної ситуації на АЗС. Комплексне прогнозування включає визначення областей хімічного, теплового та механічного забруднення у разі виникнення екстремальної ситуації на АЗС. *Мета роботи* – розроблення теоретичного інструментарію та пакета програм для комплексного прогнозування зон хімічного, теплового та хімічного забруднення навколишнього середовища за виникнення екстремальної ситуації на АЗС. *Методика.* Для прогнозування зон хімічного, теплового та механічного забруднення навколишнього середовища за виникнення екстремальної ситуації на АЗС використовуються фундаментальні рівняння механіки суцільного середовища: для розрахунку зон хімічного забруднення – рівняння масопереносу; для визначення зон теплового забруднення атмосферного повітря – рівняння енергії; для розрахунку зон механічного забруднення використовується другий закон Ньютона. Інтегрування моделювальних рівнянь здійснюється чисельним шляхом. Створено спеціалізований пакет програм для комплексного прогнозування забруднення навколишнього середовища. *Наукова новизна.* Запропоновано спеціалізований пакет програм на базі розроблених чисельних моделей для оцінювання зон хімічного, теплового та механічного забруднення, що виникає у випадку екстремальної ситуації на АЗС. На основі розроблених чисельних моделей здійснено оцінювання комплексного забруднення навколишнього середовища за екстремальної ситуації на АЗС в м. Дніпро. *Практична значущість.* Розроблені чисельні моделі реалізовані у вигляді пакета прикладних програм, що має широкий робочий діапазон. Пакет програм орієнтований на розв'язання задач у галузі екологічної безпеки та охорони праці. Визначення зон хімічного, теплового та механічного забруднення довкілля за допомогою розробленого пакета програм буде важливим для розроблення ПЛАСу. *Висновки.* Створено ефективний інструмент теоретичного аналізу зон забруднення, що формуються за екстремальної ситуації на АЗС. Наведено результати обчислювальних експериментів.

**Ключові слова:** АЗС; екстремальна ситуація; розліт уламків; хімічне забруднення; теплове забруднення

## COMPLEX ASSESSMENT OF POLLUTION ZONES IN EXTREME SITUATIONS AT ENERGY FACILITIES

BILIAIEVA V.V.<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,  
KALASHNIKOV I.V.<sup>2</sup>, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,  
BERLOV O.V.<sup>3\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,  
KOZACHYNA V.A.<sup>4</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

TYMOSHENKO O.A.<sup>5</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup> Department of Energy Systems and Energy Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 374-98-22, e-mail: [water.supply.treatment@gmail.com](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>2</sup> Kharkiv Branch Office “Design and Research Institute of Railway Transport” of the Public Joint Stock Company “Ukrainian Railway”, 7, Kotliara St., Kharkiv, 61052, Ukraine, tel. +38 (057) 724-41-25, e-mail: [uzp38@ukr.net](mailto:uzp38@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

<sup>3\*</sup> 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](mailto:berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup> 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](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup> 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: [tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua](mailto:tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

**Abstract. Problem statement.** The task of forecasting damage zones under various types of man-made load in the event of an extreme situation at a gas station is considered. Comprehensive forecasting includes the determination of areas of chemical, thermal and mechanical contamination in the event of an extreme situation at a gas station.

**The purpose of the article.** Development of a theoretical toolkit and a package of programs for complex forecasting of chemical, thermal and chemical environmental pollution zones in the event of an extreme situation at a gas station.

**Methodology.** Forecasting of zones of chemical, thermal and mechanical pollution of the environment in the event of an extreme situation at a gas station uses the fundamental equations of the mechanics of a solid environment: the mass transfer equation is used to calculate zones of chemical pollution; the energy equation is used to determine the zones of thermal pollution of the atmospheric air; Newton's second law is used to calculate mechanical contamination zones.

Integration of modeling equations is carried out numerically. A specialized package of programs for comprehensive forecasting of environmental pollution has been created. **Scientific novelty.** A specialized package of programs based on developed numerical models is proposed for the assessment of chemical, thermal and mechanical pollution zones that arise in the event of an extreme situation at a gas station.

On the basis of the developed numerical models, an assessment of complex environmental pollution during an extreme situation at a gas station in the city of Dnipro was carried out. **Practical significance.** The developed numerical models are implemented in the form of a package of application programs with a wide working range. The program package is focused on solving problems in the field of environmental safety and occupational health and safety. Determining the zones of chemical, thermal and mechanical pollution of the environment with the help of the developed program package will be important in the development of the plan for localization and liquidation of emergency situations and accidents. **Conclusions.** An effective tool for theoretical analysis of pollution zones formed during an extreme situation at gas stations has been created. The results of computational experiments are presented.

**Keywords:** *gas station; extreme situation; flying debris; chemical pollution; thermal pollution*

**Постановка проблеми.** Прогнозування ризику ураження людини під час екстремальних ситуацій на об'єктах енергетики має дуже велике значення, особливо коли такі об'єкти розташовані в селитебних зонах. Екстремальні ситуації можуть спричинити хімічне, теплове та механічне забруднення навколишнього середовища та, як наслідок, – токсичне, теплове ураження людини, а також ураження від металної дії уламків.

Тому вкрай важливо для кожного об'єкта енергетики, що розташований у селитебній зоні, визначати зони ураження та створювати карту зон небезпеки в містах, де розміщено багато об'єктів енергетики.

**Аналіз останніх досліджень.** Оцінювання зон ураження в разі виникнення

екстремальних ситуацій базується на використанні математичних моделей. Найбільш поширені модель Гаусса [8; 10], чисельні моделі [2–5; 7; 9], аналітичні моделі [1]. До недавнього часу, наприклад, в МНС, використовувалися емпіричні моделі у розробленні ПЛАСу (План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій), але підвищення вимоги до якості прогнозованої інформації суттєво зменшило інтерес до емпіричних моделей. Розроблення багатофакторних моделей, орієнтованих на виконання повсякденних завдань, так званих «operational models», продовжується і стало сучасним трендом у галузі екологічної безпеки та охорони праці.

**Мета статті** – оцінювання зон ризику ураження людини у випадку ймовірної

пожежі на АЗС на базі розроблених чисельних моделей та створеного на їх базі пакета програм комплексного оцінювання зон ураження.

**Опис об'єкта.** Типовим явищем для багатьох міст стало розташування АЗС у селитебних зонах. Тому вкрай важливе оцінювання зон ураження у випадку екстремальних ситуацій на цих енергетичних об'єктах. У цій роботі розглядається АЗС «АВІАС» в м. Дніпро (рис. 1).

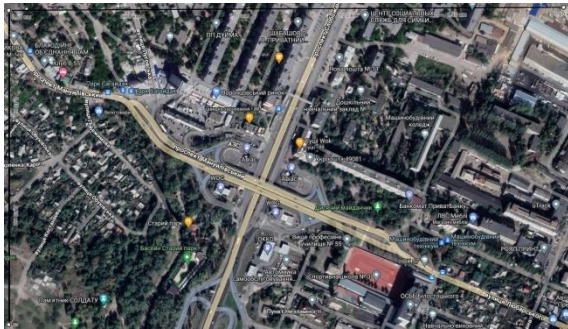


Рис. 1. Енергетичний об'єкт (АЗС «АВІАС») в м. Дніпро (Google Image, 2023)

Ця АЗС розташована в селитебній зоні, що створює загрозу ураження людини в разі виникнення екстремальної ситуації на даному об'єкті.

**Методика.** Розглядається оцінювання зон ризику ураження людини за таких видів:

1) хімічне ураження (вражаючий фактор – концентрація хімічно небезпечної речовини);

2) теплове ураження (вражаючий фактор – підвищена температура повітря);

3) механічне ураження (вражаючий фактор – метальна дія уламків).

Для оцінювання ризику ураження людини використовуються такі моделювальні рівняння:

– для оцінювання ризику хімічного ураження – рівняння переносу [1; 2; 7]:

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

де  $S$  – середнє (за висотою переносу) значення концентрації хімічно небезпечної речовини;  $u, v$  – компоненти вектора

швидкості вітру в проекції на осі координат  $x, y$ , відповідно;  $x_i, y_i$  – декартові координати  $i$ -го джерела викиду хімічно небезпечної речовини на об'єкті;  $t$  – час;  $\mu_x, \mu_y$  – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії;  $\delta(x_i, y_i)$  – дельта-функція Дірака, за допомогою якої в моделі задається місце аварійного викиду. Інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини дорівнює  $Q$ .

Граничні умови для рівняння (1) наведені в [3; 7]:

– для оцінювання ризику термічного ураження використовується рівняння енергії в наближенні Бусінеска;

– рівняння енергії (планова модель) [2; 3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \text{div}(a \text{ grad } T), \quad (2)$$

де  $T$  – температура атмосферного повітря;  $a = (a_x, a_y)$  – коефіцієнти температуро-провідності;  $x, y$  – декартові координати місця пожежі;  $t$  – час.

Граничні умови для рівняння (2) наведені в [3].

– механічне ураження людини для розрахунку руху в повітрі уламка використовуються такі рівняння руху матеріальної точки:

$$m \frac{du}{dt} = -C_x \frac{\rho_e V^2}{2} \cdot S \cdot u, \quad (3)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_e V^2}{2} \cdot S \cdot v - mg, \quad (4)$$

де  $m$  – маса уламка;  $u, v$  – проекції вектора швидкості руху уламка на осі координат;  $\rho_e$  – щільність повітря;  $C_x$  – коефіцієнт опору уламка;  $S$  – площа мідельового перерізу уламка;  $V$  – вектор швидкості руху уламка.

Початкова умова для рівнянь (3), (4) така: задається початкова швидкість уламка та ухил його «вильоту» від місця аварії.

У рівняннях (3) та (4) вісь  $Y$  направлена вертикально вгору, а вісь  $X$  – в напрямку горизонтального руху уламка.

**Чисельні моделі.** Для чисельного інтегрування рівняння переносу (1) здійснюється його розщеплення таким чином [3]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = 0$$

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

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i).$$

Для чисельного інтегрування системи (5) застосовуються неявні різницеві схеми [3].

Для розв'язання рівняння енергії здійснюється його розщеплення таким чином:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (7)$$

Далі здійснюються наступні перетворення [3]:

$$\frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial u^+ T}{\partial x} + \frac{\partial u^- T}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial v^+ T}{\partial y} + \frac{\partial v^- T}{\partial y},$$

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

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

$$\frac{\partial u^+ T}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ T_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ T^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- T}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- T_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- T^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ T}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ T_{i,j} - v_{i,j}^+ T_{i,j-1}}{\Delta y} = L_y^+ T^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- T}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- T_{i,j+1} - v_{i,j}^- T_{i,j}}{\Delta y} = L_y^- T^{n+1}.$$

Після чого застосовується така схема розщеплення для чисельного інтегрування рівняння (7):

– на першому кроці різницеве рівняння має вигляд:

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

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

Невідоме значення температури  $T$  в кожному рівнянні визначається за формулою «рахунку, що біжить».

Для чисельного інтегрування рівняння (7) використовується така залежність:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^n + \Delta t \frac{T_{i+1,j}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j}^n}{\Delta x^2} a_x + \Delta t \frac{T_{i,j+1}^n - 2T_{i,j}^n + T_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} a_y.$$

Чисельне інтегрування рівнянь (3) та (4) здійснюється методом Ейлера [6]. За допомогою цього методу обчислюються значення компонент швидкості руху уламка  $u$ ,  $v$  на новому часовому шарі « $n+1$ », а далі розраховується дальність відльоту уламку  $x(t)$ . Розрахункові залежності мають вигляд:

$$u^{n+1} = u^n - dt * C_x \frac{\rho_e V^2}{2m} \cdot S \cdot u, \quad (8)$$

$$v^{n+1} = v^n - dt * C_x \frac{\rho_e V^2}{2m} \cdot S \cdot v - dt * g, \quad (9)$$

$$x(t) = x_0 - dt \cdot V,$$

де  $x_0$  – координата місця відльоту уламка.

Для проведення розрахунку на базі залежностей (4) та (5) потрібно задати кут  $\alpha$  вильоту уламка. Значення цього параметра визначається на базі експертних оцінок. Здійснено програмування побудованих чисельних моделей та розроблено пакет програм для комплексного оцінювання зон небезпеки в разі екстремальних ситуацій на АЗС.

**Результати.** На базі розроблених чисельних моделей виконано розрахунки хімічного, теплового та механічного забруднення атмосферного повітря біля АЗС у випадку пожежі на АЗС. Прийнято, що на момент виникнення екстремальної ситуації на АЗС швидкість вітру 6,7 м/с; температура повітря на місці пожежі 1 200 °С; початкова швидкість сталевго уламка 65 м/с; коефіцієнт опору уламка 0,4; висота викиду уламка 4,5 м, приведений діаметр уламка 0,002 м; кут вильоту уламка  $\alpha = 20^\circ$ .

Результати моделювання показані на рисунках 2–4.

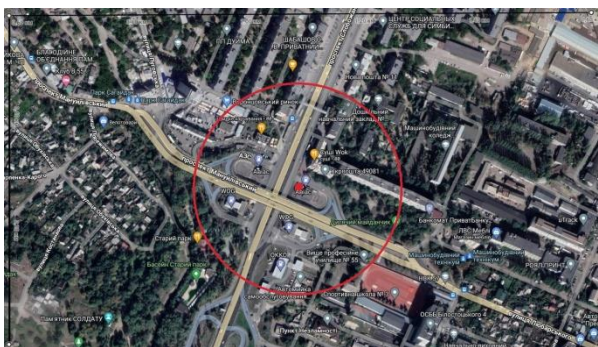


Рис. 2. Зона ураження під час розльоту уламків

Як можна бачити з рисунка 2, джерело небезпеки – АЗС розташоване на відкритій місцевості. Тому уламки, що утворюються під час екстремальної ситуації, створюють ризик масштабного ураження людини в цій області. Ці уламки досягають зупинок транспорту, що розташовані по обидва боки вулиці.

Далі на рисунках показано динаміку розвитку зон теплового забруднення повітря в разі пожежі на АЗС.



Рис. 3. Зона теплового забруднення,  $t = 3\text{хв}$  :  
1 –  $T = 375^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 294^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T = 134^\circ\text{C}$



Рис. 4. Зона теплового забруднення,  $t = 6\text{хв}$  :  
1 –  $T = 340^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 261^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T = 132^\circ\text{C}$

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання, наведених на рисунках 4, 5, свідчать, що у разі виникнення екстремальної ситуації на даному об'єкті спричинить інтенсивне теплове забруднення повітря на вулиці. Температура в цій зоні значно перевищує показник у 100 °С, що викличе тяжкі термічні ураження людини.

На рисунках 5, 6 показано, як розвивається зона хімічного забруднення продуктом горіння – СО.



Рис. 5. Зона хімічного забруднення, концентрація СО,  
 $t = 5\text{хв}$  : 1 –  $C = 46\text{ мг/м}^3$ ;  
2 –  $C = 64\text{ мг/м}^3$ ; 3 –  $C = 84\text{ мг/м}^3$



Рис. 6. Зона хімічного забруднення, концентрація СО,  
 $t = 15\text{хв}$  : 1 –  $C = 41\text{ мг/м}^3$ ;  
2 –  $C = 59\text{ мг/м}^3$ ; 3 –  $C = 78\text{ мг/м}^3$

Якщо врахувати, що ГДК для СО дорівнює 20 мг/м<sup>3</sup>, можна бачити (рис. 5, 6),

що за виникнення екстремальної ситуації на даному об'єкті створюється ризик токсичного ураження людини.

Наведені результати обчислювального експерименту показують, що розташування АЗС у селитебних зонах створює реальний ризик ураження людини. Таким чином, біля АЗС потрібно проектувати системи зменшення негативного впливу екстремальної ситуації на довкілля.

**Наукова новизна та практична цінність.** На базі чисельних моделей розроблено спеціалізований пакет програм, що дозволяє прогнозувати хімічне, теплове та механічне забруднення атмосферного повітря у випадку екстремальної ситуації на АЗС. Пакет програм дає можливість швидко

оцінювати зони ураження, що важливо для розроблення Плану локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій.

### Висновки

1. Створено інструмент комплексного оцінювання забруднення довкілля у випадку екстремальної ситуації на АЗС.

2. Оцінювання ризику ураження за допомогою розробленого інструменту здійснюється на базі фундаментальних моделей, що дозволяє отримати науково обґрунтовані результати прогнозу.

3. Результати моделювання показують, що розташування АЗС у селитебних зонах створює високий ризик ураження людей.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. 1985. 273 с.
2. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Чередниченко Л. А. Оцінка ризику термічного ураження у випадку аварійного горіння. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 6. С. 54–60.
3. 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 : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
4. Бруязкий Е. В. *Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов*. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
5. Пшинько А. Н., Беляев Н. Н., Машихина П. Б. Моделирование загрязнения атмосферы при техногенных авариях. Днепропетровск : Нова ідеологія, 2011. 166 с.
6. Самарский А. А. Теория разностных схем. 1983. 616 с.
7. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст]. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.
8. Anthony Michael Barret. *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. Dissertation (Pittsburg, Pennsylvania, USA), 2009. 123 p.
9. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. 2012. Pp. 87–91.
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.

### REFERENCES

1. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecasting and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad : Gidrometeoizdat, 1985. (in Russian).
2. Biliaiev M.M., Berlov O.V., Biliaieva V.V. and Cherednichenko L.A. *Ocinka ryzyku termichnogo urazhennya u vypadku avarijnogo gorinnya* [Assessment of the risk of thermal injury in case of accidental burning]. *Visnyk Prydniprovkoyi derzhavnoyi akademiyi budivnyctva ta arxitektury* [Bulletin of the Dnipro State Academy of Construction and Architecture]. 2020, vol. 6, pp. 54–60. (in Ukrainian).
3. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V., Berlov O.V. and Kozachyna V.A. *CFD-modelyuvannya v analizi efektyvnosti system zaxystu dovkillya ta pracivnykiv na robochyx misyax* [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of environmental protection systems and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2022. (in Ukrainian).
4. Bruyaczkyj E.V. *Teoriya atmosfernoj diffuzii radioaktivnyh vubrosov* [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kyiv : Institute of Hydromechanics NAS of Ukraine, 2000. (in Russian).
5. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennyh avariayah* [Modeling of atmospheric pollution during technogenic accidents : monograph]. Dnipropetrovsk: Nova Ideologiya Publ., 2011. (in Russian).

6. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. 1983. (in Russian).

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

8. Anthony M.B. *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness* : dissertation. Pittsburg, Pennsylvania, USA, 2009.

9. Biliaiev M. *Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. Air Pollution Modeling and its Application XXI* (Springer). 2012.

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.*

Надійшла до редакції: 15.10.2023.