

УДК 519.6:502.5:504.054

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.34.968

## ЕКСТРЕМАЛЬНІ СИТУАЦІЇ НА ОБ'ЄКТАХ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ: ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ ЛЮДИНИ

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

<sup>1</sup>Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</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>3</sup>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](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>4</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 оцінювання зон ураження людей у разі виникнення екстремальної ситуації на АЗС, розташованій в людному місці м. Дніпро. Здійснюється аналіз розмірів зон теплового забруднення повітря та зони можливого ураження людей у випадку розлітання уламків, через виникнення екстремальної ситуації на АЗС. Для розв'язання задач даного класу потрібна розробка спеціалізованих математичних моделей. **Мета роботи** – оцінювання ризику ураження людини від металної дії уламків під час пожежі на АЗС у випадку виникнення екстремальної ситуації. **Методика.** Для аналізу зон ураження під час розльоту уламків використовується числова модель, що базується на інтегруванні другого закону Ньютона для руху матеріальної точки в повітрі. На базі даної числової моделі створено комп'ютерну програму. Для аналізу зон теплового забруднення під час пожежі на АЗС використовується числове інтегрування рівняння енергії, яке враховує швидкість руху повітряних мас, коефіцієнти теплопровідності, температуру повітря на місці пожежі. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну числову модель для аналізу зон ураження від металної дії уламків. Визначено зони ураження за можливої пожежі на АЗС в м. Дніпро. **Практична значущість.** Розроблено програму для розрахунку динаміки руху уламків у повітрі. Це дозволяє визначати зони ураження від металної дії уламків різного розміру. Визначено зони теплового забруднення повітря, що дозволяють оцінювати ризик термічного ураження людей. **Висновки.** Розроблено ефективний інструмент аналізу ризику ураження людей уламками під час пожежі на АЗС. Наведено результати обчислювальних експериментів.

**Ключові слова:** паливно-енергетичний комплекс; АЗС; пожежа; розліт уламків; ризик ураження; теплове забруднення

## EXTREME SITUATIONS AT FACILITIES OF THE FUEL AND ENERGY COMPLEX: ASSESSMENT OF THE RISK OF HUMAN INJURY

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

<sup>1</sup>Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: [biliaiev.m@gmail.com](mailto:biliaiev.m@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Department of Life Safety, Prydniprovka 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>3</sup>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](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2399-3124

<sup>4</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 assessing the zones of human damage in the event of an extreme situation at a gas station located in a crowded place in the city of Dnipro is under consideration. An analysis of the size of thermal air pollution zones and the zone of possible injury to people in the event of flying debris, created in the event of an extreme situation at a gas station, is being carried out. To solve the problems of this class, the development of specialized mathematical models is required. **The purpose of the article.** Assessment of the risk of injury to a person from the throwing action of debris and in the event of a fire at a gas station in the event of an emergency situation. **Methodology.** A numerical model based on the integration of Newton's second law for the movement of a material point in the air is used to analyze the damage zones during the flight of fragments. A computer program was created on the basis of this numerical model. Numerical integration of the energy equation is used to analyze thermal pollution zones during a fire at a gas station. This equation takes into account the speed of movement of air masses, coefficients of thermal conductivity, air temperature at the site of the fire. **Scientific novelty.** An effective numerical model has been developed for the analysis of damage zones from the throwing action of debris, which are formed in the event of an extreme situation at a gas station. Damage zones in the event of a possible fire at a gas station located in the city of Dnipro have been determined. **Practical significance.** A program has been developed for calculating the dynamics of the movement of debris in the air, which are formed in an extreme situation at a gas station. This makes it possible to determine the damage zones from the throwing action of fragments of different sizes. Zones of thermal air pollution are defined, which allow to assess the risk of thermal damage to people. **Conclusions.** An effective tool for analyzing the risk of injury to people in the event of flying debris and a fire at a gas station has been developed. The results of computational experiments are presented.

**Keywords:** *fuel and energy complex; gas station; fire; flying debris; risk of damage; thermal pollution*

**Постановка проблеми.** Об'єкти паливно-енергетичного комплексу належать до об'єктів підвищеного рівня небезпеки [4]. У випадку екстремальної ситуації на такому об'єкті з'являються різні фактори ураження, що створюють загрозу життю та здоров'ю людей. У багатьох екстремальних ситуаціях виникає ризик ураження людей внаслідок пожежі та розльоту уламків від обладнання.

Слід вказати, що уламки можуть розлітатися на достатньо велику відстань від місця екстремальної події. Особливо це небезпечно, коли об'єкт розташований у місті (наприклад, АЗС). Отже, виникає важлива задача оцінювання зон можливого ураження не тільки за появи нагрітого повітря під час пожежі, а і в разі механічного забруднення повітря – руху уламків.

**Аналіз останніх досліджень.** Проблема оцінювання ризику за екстремальних ситуацій на об'єктах підвищеної небезпеки досить широко розглядається в науковій літературі [4–6; 8; 10; 12]. При цьому основною тенденцією стало розроблення швидкорозрахункових математичних моделей [1; 2; 5; 9], що дозволяють оперативно визначати зони токсичного, термічного ураження за різних екстремальних ситуацій.

Як правило, ці моделі мають вигляд спеціалізованих комп'ютерних програм для оцінювання зон ураження (наприклад, програми: ALOHA, CALPUFF, AERMOD, ADMS та ін.) [4; 11]. Такі моделі та комп'ютерні програми дуже зручні для практичних розрахунків. Але проблемі ураження людини від метального руху уламків значно менше приділяється уваги. Це дає підставу для розроблення ефективних, спеціалізованих комп'ютерних програм розв'язання задач даного класу – визначення розмірів зон можливого ураження людини від метальної дії уламків, що створюються на об'єктах паливно-енергетичного комплексу за екстремальних ситуацій та аналізу ризику ураження людей, що перебувають поблизу небезпечного об'єкту.

**Мета дослідження** – оцінення ризику ураження уламками у випадку виникнення екстремальної ситуації на АЗС.

**Опис об'єкту.** Розглядається АЗС, розташована в м. Дніпро пр. Богдана Хмельницького (рис. 1). Поблизу цього небезпечного об'єкта є стадіон, де тренуються підлітки та діти, зона відпочинку, зупинки міського транспорту.

Тобто біля цього небезпечного об'єкта протягом доби перебуває значна кількість людей, що створює загрозу їх масового ураження у разі виникнення екстремальної ситуації.

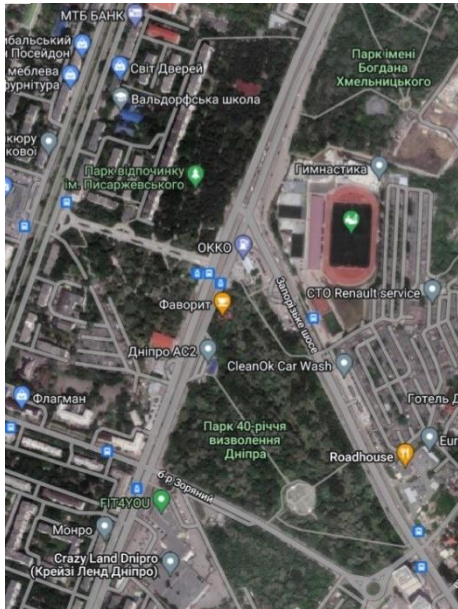


Рис. 1. АЗС «ОККО» в м. Дніпро (Google Image, 2023)

**Методика.** Уламки, що утворюються в результаті вибуху чи пожежі, можуть мати різну геометричну форму, різну щільність матеріалу  $\rho_{ст}$ , розміри. Для оцінювання ризику ураження від метальної дії уламків потрібно знати довжину розльоту уламків та їх швидкість на певній відстані – біля об'єкта ураження (людини):

$$m \frac{dV}{dt} = -F_R - F_g, \quad (1)$$

де  $m$  – маса уламка;  $V$  – вектор швидкості руху уламка в повітрі;  $F_g = mg$  – сила тяжіння,  $F_R = C_x \frac{\rho_в V^2}{2} \cdot S$  – сила опору уламка;  $C_x$  – коефіцієнт опору уламка;  $\rho_в$  – щільність повітря;  $S$  – площа міделевого перерізу уламка.

Зазначимо, що за рахунок різного значення коефіцієнта  $C_x$  можна моделювати рух уламків різної форми в повітрі. Для проведення «пілотних» розрахунків можна припустити, що уламок має форму кулі.

Радіус такої приведенної кулі визначається так:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3W}{4\pi}},$$

де  $W$  – об'єм уламка.

Якщо прийняти такий підхід, то значення міделевого перерізу обчислюється так:

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

де  $d = 2R$  – діаметр приведенної кулі.

Для практичного використання рівняння (1) напишемо його в проекції на осі координат:

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

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_в V^2}{2} \cdot S \cdot v - mg, \quad (3)$$

де  $u, v$  – проекції вектора швидкості руху уламка на осі координат. Зазначимо, що вісь  $Y$  направлена вертикально вгору, а вісь  $X$  – у напрямку горизонтального руху уламка.

Рівняння (2), (3) розв'язуються числовим шляхом за допомогою методу Ейлера [7]. Обчислення значень компонент швидкості руху уламка  $u, v$  на новому часовому шарі « $n+1$ » здійснюється на базі таких залежностей:

$$u^{n+1} = u^n - dt * C_x \frac{\rho_в V^2}{2m} \cdot S \cdot u, \quad (4)$$

$$v^{n+1} = v^n - dt * C_x \frac{\rho_в V^2}{2m} \cdot S \cdot v - dt * g \quad (5)$$

Для проведення розрахунку на базі залежностей (4) та (5) потрібно задати кут  $\alpha$  вильоту уламка. Значення цього параметра обчислюється на базі експертних оцінок.

Дальність  $x(t)$  вильоту уламка від місця виникнення екстремальної ситуації визначається так:

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

де  $x_0$  – координата місця відльоту уламка.

Здійснено програмування числової моделі (4), (5) та створено код «*Flight*». Мова програмування – FORTRAN.

Зауважимо, що за межу зони ураження приймається зона, де величина  $Y$  дорівнює порядку 1,2 м – ураження очередини людини.

Для оцінювання ризику термічного ураження людей за можливої пожежі на даній АЗС використовується наступне рівняння енергії (планова модель) [3; 4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \text{div}(a \text{ grad } T), \quad (6)$$

де  $T$  – температура повітря;  $u, v$  – складові вектора руху потоку повітря;  $a = (a_x, a_y)$  – коефіцієнти теплопровідності;  $x, y$  – декартові координати;  $t$  – час.

Граничні умови для рівняння (6):

1.  $T = T_{in}$  – на межі, де потік надходить у розрахункову область ( $T_{in}$  – фонові температура повітря).

2.  $T_{i+1,j} = T_{i,j}$  – на межі виходу повітряного потоку з області дослідження ( $T_{i+1,j}$  – температура в останній різницевій комірці;  $T_{i,j}$  – температура в попередній різницевій комірці).

При  $t = 0$  приймається  $T = T_0$ , де  $T_0$  – температура повітря там, де має місце пожежа. В іншій частині області дослідження температура дорівнює фоновій температурі атмосферного повітря.

Для числового інтегрування рівняння (6) використовується різницева схема, розглянута в [4]. Дана числова модель використана для оцінювання зон ризику можливого термічного ураження людей біля АЗС.

**Результати.** На базі комп'ютерної програми «*Flight*» здійснено розрахунок зони ураження при розльоті сталевого уламка, у випадку можливої екстремальної ситуації на АЗС (рис. 1). Приймається, що викид має місце на АЗС внаслідок вибуху обладнання. Розрахунок здійснено за такими

даними: початкова швидкість сталевого уламка 50 м/с; коефіцієнт опору уламку 0,47; висота викиду уламка 3 м, приведений діаметр уламка 0,005 м.

На рисунку 3 показано результати прогнозування для кута вильоту  $\alpha = 40^\circ$ .

Як бачимо з рисунку 2, зона небезпечного розльоту уламків досягає соціально значущих зон: це дитячий стадіон, зупинки міського транспорту, зона відпочинку. Тобто, розліт уламків створює високий ризик ураження людей.

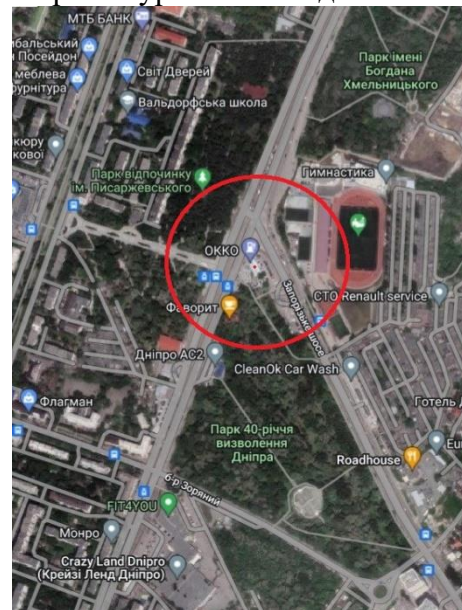


Рис. 2. Зона ураження під час розльоту уламків

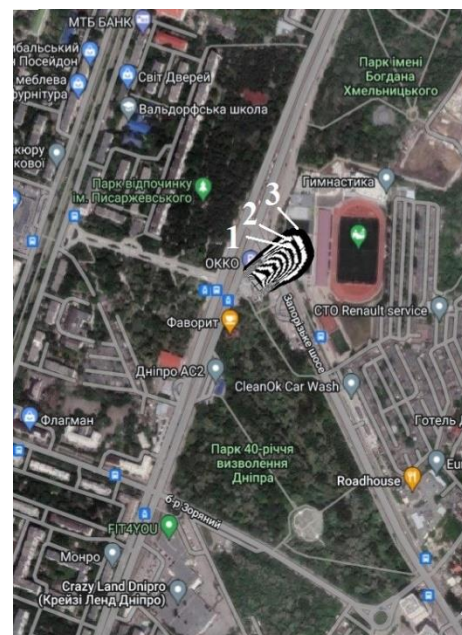


Рис. 3. Зона теплового забруднення,  $t = 22\text{с}$ : 1 –  $T = 320^\circ\text{C}$ ; 2 –  $T = 282^\circ\text{C}$ ; 3 –  $T = 120^\circ\text{C}$

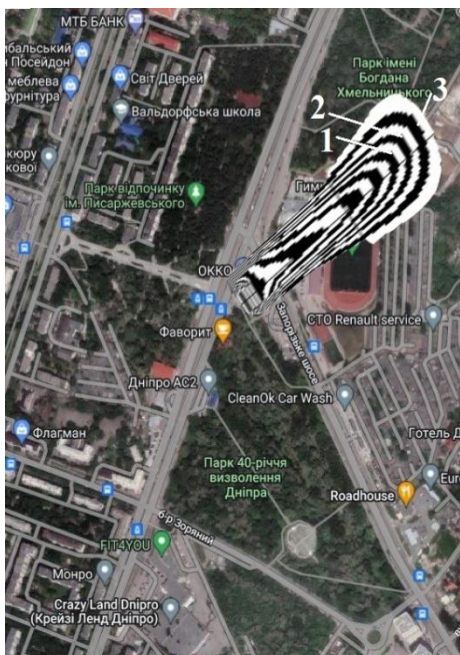


Рис. 4. Зона теплового забруднення,  $t = 170$  с:  
 1 –  $T = 310$  °C; 2 –  $T = 202$  °C; 3 –  $T = 127$  °C

Час розрахунку на базі даної моделі складає 1 секунду.

Далі на рисунках 3, 4 показано динаміку розвитку зон теплового забруднення повітря під час пожежі на АЗС. Температура повітря на місці пожежі приймається  $1000$  °C. Швидкість вітру  $4$  м/с.

Як видно з рисунків 3 та 4, зона теплового забруднення дуже швидко розвивається біля АЗС, отож виникає ризик термічного ураження людей в соціально значимих зонах. Виникає ризик термічного ураження легень, шкіри людей, які потрапляють у зону теплового забруднення.

Зазначимо, що час розрахунку складає  $5$  с.

**Наукова новизна та практична цінність.** На базі числової моделі нестационарного руху матеріальної точки в повітряному просторі розраховано зони ураження уламками у випадку екстремальної ситуації на АЗС. Запропонована модель дозволяє визначити довжину розльоту уламків залежно від комплексу фізичних параметрів, що впливають на довжину розльоту (маса уламка, початкова швидкість тощо).

На базі числової моделі визначено динаміку формування областей теплового забруднення повітря в разі можливої пожежі на АЗС. Розглянуті моделі можуть бути використані для розроблення плану ліквідації аварійної ситуації на хімічно-небезпечному об'єкті, яким є АЗС.

#### Висновки.

1. На базі числової моделі та створеної комп'ютерної програми оцінено розмір зон ураження від металевих уламків у випадку екстремальної ситуації на АЗС.

2. Результати розрахунку показали, що уламки потрапляють у місця, де можливе скупчення людей.

3. На базі числової моделі здійснено оцінювання зон термічного ураження у випадку пожежі на АЗС. Результати розрахунку показують, що дуже швидко після початку пожежі в область термічного ураження потрапляють екологічно значущі зони.

### 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. Біляев 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.
4. Біляев М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделирование в анализе эффективности систем защиты доквилья та працівників на робочих місцях : монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
5. Бруацкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 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. 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.

9. 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. 123 p.
10. 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.
11. 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.

## REFERENCES

1. Basmanov A.E. and Govalenkov S.S. *Ocenka koncentraciyi opasnux xymycheskyykh veshhestv v vozduxe pry nepreruvnoy aktivnosti istochnyka* [Estimation of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous source activity]. *Problemy nadzvyhajnykh sytuacij* [Problems of Emergency Situations]. 2010, vol. 12, pp. 21–27. (in Russian)
2. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecasting and regulation of atmospheric pollution]. Leningrad : Gidrometeoizdat Publ., 1985, 273 p. (in Russian)
3. 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 Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2020, vol. 6, pp. 54–60. (in Ukrainian)
4. 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 miscyax : monografiya* [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of environmental protection systems and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2022, 268 p. (in Ukrainian)
5. Bruyaczkyj E.V. *Teoriya atmosfernoj diffuzii radioaktivnykh vubrosiv* [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kyiv : Institute of Hydromechanics NAS of Ukraine, 2000, 443 p. (in Russian)
6. 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)
7. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow : Nauka Publ., USSR, 1983, 616 p. (in Russian)
8. 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 Publ., 1997, 368 p. (in Russian)
9. 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, 123 p.
10. 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.
11. Ilic P., Ilic S. and Stojanovic Bjelic L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool. ALOHA Software. *Quality of Life*. No. 9, 2018, pp. 38–45.

Надійшла до редакції: 13.07.2023.