

УДК 519.6:331.45:622.235

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.56.1023

ЗНИЖЕННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ У ВИПАДКУ МЕТАЛЬНОЇ ДІЇ УЛАМКІВ

БІЛЯЄВ М. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КАЛАШНІКОВ І. В.², *докт. техн. наук, проф.*,
БЕРЛОВ О. В.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*,
КОЗАЧИНА В. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
ТИМОШЕНКО О. А.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ 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, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² 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, ORCID ID: 0000-0002-2814-380X

^{3*} Кафедра охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Український державний університет науки і технологій, 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, 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

⁵ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається задача оцінювання ризику ураження нафтоховища уламками у разі вибуху дрона. Здійснюється аналіз величини швидкості руху уламка та ефективності використання захисної перешкоди для зупинення руху уламка в напрямі нафтоховища. **Мета роботи** – оцінення ризику ураження стінки нафтоховища та ефективності використання захисної перешкоди від металльної дії уламків від вибуху дрона. **Методика.** Для аналізу ризику ураження нафтоховища при розльоті уламків дрона використовується чисельна модель, що базується на інтегруванні рівняння руху матеріальної точки та емпіричної моделі, що дозволяє визначити швидкість уламка після проходження тіла захисної перешкоди. Побудована чисельна модель враховує початкову швидкість уламка, розмір уламка, напрям руху уламка, висоту викиду уламка. На базі даної чисельної моделі створено комп'ютерний код для проведення обчислювального експерименту. **Наукова новизна.** Розроблено ефективну математичну модель для аналізу ризику ураження нафтоховища від металльної дії уламків, що утворюються від вибуху дрона. Модель дозволяє визначити ефективність використання перешкоди для захисту нафтоховища від металльної дії уламків. **Практична значущість.** Розроблено комп'ютерний код для розрахунку динаміки руху уламків у повітрі, що утворюються від вибуху дрона. Використання цього коду дозволяє підібрати раціональні розміри захисної перешкоди на промисловому майданчику для захисту нафтоховища від ураження. **Висновки.** Розроблено ефективний інструмент аналізу ризику ураження нафтоховища від металльної дії уламків, що утворюються від вибуху дрона. Наведено результати обчислювальних експериментів.

Ключові слова: розліт уламків; ризик ураження; динаміка руху уламка; захисна перешкода; чисельне моделювання

REDUCTION OF THE RISK OF DAMAGE AT PROJECTILE DEBRIS PROJECTILE EFFECT

BILIAIEV M.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KALASHNIKOV I.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERLOV O.V.^{3*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
KOZACHYNA V.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TYMOSHENKO O.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ 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, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

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

^{3*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic 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

⁴ Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryan St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel.: +38 (056) 273-15-09, e-mail: water.supply.treatment@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6894-5532

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 (050) 452-43-63, e-mail: tymoshenko.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

Abstract. Problem statement. The task of assessing the risk of damage to an oil storage facility by debris in the event of a drone explosion is considered. An analysis of the debris movement velocity and the effectiveness of the use of a protective barrier to stop the debris movement in the direction of the oil storage facility is carried out. **The purpose of the article.** Assessment of the risk of damage to the oil storage wall and the effectiveness of the use of a protective barrier against the throwing action of debris during a drone explosion. **Methodology.** A numerical model based on the integration of the equation of a material point motion and an empirical model is used to analyze the risk of damage to an oil storage facility when the debris of a drone flies off. The developed numerical model takes into account the initial velocity and size of the debris, the direction of the debris movement, and the height of the debris ejection. On the basis of this numerical model, a computer code was created for conducting a computational experiment. **Scientific novelty.** An effective mathematical model is developed for analyzing the risk of damage to an oil storage facility from the throwing action of debris generated by a drone explosion. The model makes it possible to determine the effectiveness of using an obstacle to protect an oil storage facility from the throwing action of debris. **Practical value.** A computer code is developed for calculating the dynamics of the debris movement in the air, which are formed during the explosion of a drone. The use of this code makes it possible to select the rational dimensions of the protective barrier at the industrial site to protect the oil storage from damage. **Conclusions.** An effective tool for analyzing the risk of damage to an oil storage facility from the throwing action of debris created by a drone explosion is developed. The results of computational experiments are presented.

Keywords: *flying debris; risk of damage; dynamics of the debris movement; protective barrier; numerical modeling*

Постановка проблеми. Екстремальні ситуації на території промислових об'єктів створюють загрозу життю робітників та мають значний негативний вплив на довкілля. За екстремальних ситуацій на промислових майданчиках можлива поява різних вражаючих факторів, наприклад, поява в повітрі токсичних речовин, утворення вогняної кулі тощо [1; 2; 5; 9]. У випадку вибухів на промисловому майданчику має місце розліт уламків, які створюють ризик ураження персоналу та об'єктів внаслідок руху уламків зі значною швидкістю. Особливу увагу привертають проблеми, пов'язані з розльотом уламків при атаках дронів. Якщо така екстремальна ситуація виникає на промисловому майданчику, де розташовані сховища нафтопродуктів, уламки, що утворилися від вибуху, можуть пошкодити корпус нафтоосховища. Це спричинить вилиття продуктів, пожежу, викид в атмосферне повітря її продуктів та теплове забруднення довкілля. Отож, дуже важливо розробляти засоби захисту нафтоосховищ від уламків

через вибухи дронів. Це дає підставу для проведення наукових досліджень з метою удосконалення систем захисту нафтоосховищ на промислових майданчиках у разі вибухів дронів.

Мета статті – оцінення ефективності використання захисних перешкод для зниження ризику ураження нафтоосховища уламками дрона.

Методика. Розглядається ситуація розльоту уламків від вибуху дрона на промисловому майданчику, де розташовані нафтоосховища. Для захисту корпусу нафтоосховища від металевих уламків пропонується металеві пластини як перешкоди. Ставиться задача розроблення математичної моделі руху уламка на шляху якого розташована перешкода.

Уламки, що утворюються від вибуху дрона, мають різну геометричну форму, масу, швидкість руху.

Крім цього, уламки можуть утворюватися на різній висоті та рухатися під різним кутом до об'єкта, який потрібно захистити (далі – об'єкт). Для побудови

математичної моделі руху уламка та взаємодії його з корпусом захисної перешкоди робимо такі припущення :

1) уламок має форму кулі; радіус R цієї приведенної кулі визначаємо знаючи об'єм уламка W ;

2) маса уламка – відома;

3) швидкість та напрям руху уламка від точки вибуху – відомі;

4) відома довжина від місця розльоту уламків до перешкоди та об'єкта;

5) кут α вильоту уламка відносно поверхні землі – відомий;

6) відома щільність ρ_{cm} матеріалу захисної перешкоди.

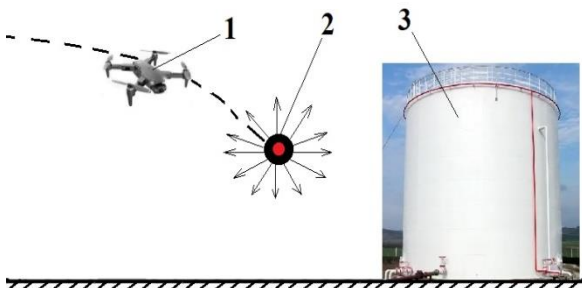


Рис. 1. Схема вибуху дрона біля нафтохранилища:
1 – дрон; 2 – місце вибуху;
3 – нафтохранилище (об'єкт)

Траєкторію руху уламка від місця вибуху до об'єкта розбиваємо на три частини :

1. Зона № 1 – від місця вибуху до перешкоди.

2. Зона № 2 – рух уламка всередині захисної перешкоди.

3. Зона № 3 – рух уламка від захисної перешкоди до об'єкта (якщо уламок пройде зону № 2).

Динаміку руху уламка в першій та третій зоні будемо описувати за допомогою другого закону Ньютона :

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

де m – маса уламка; V – вектор швидкості руху уламка в середовищі; $F_g = mg$ – сила тяжіння; $F_R = C_x \frac{\rho_6 V^2}{2} \cdot S$ – сила опору уламка; C_x – коефіцієнт опору уламка; ρ_6 –

щільність середовища; S – площа мідельового перерізу уламка; t – час.

Зазначимо, що якщо уламок має об'єм W , радіус приведенної кулі визначається так:

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

Тоді площа мідельового перерізу уламка буде:

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

де $d = 2R$.

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

$$m \frac{du}{dt} = -C_x \frac{\rho_6 V^2}{2} \cdot S \cdot u, \quad (2)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_6 V^2}{2} \cdot S \cdot v - mg, \quad (3)$$

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

Далі здійснюється чисельне інтегрування рівнянь (2), (3) для визначення швидкості руху уламка в першій та третій зонах.

Розглянемо зараз другу зону, де має місце взаємодія уламка з перешкодою. Перешкода – це металева пластина. Товщина перешкоди, за якої уламок повністю втрачає швидкість визначається на базі емпіричної моделі (К. Е. Кочетков, В. А. Котляревський, А. В. Забегаєв):

$$h_* = \frac{0.138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot V}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}}, \quad (4)$$

де d_1 – діаметр уламка; ρ_1 – щільність матеріалу уламка; V – швидкість руху уламка; σ_2 – динамічна межа текучості матеріалу перешкоди; ρ_2 – щільність матеріалу перешкоди.

Якщо товщина перешкоди h_2 буде меншою ніж h_* , швидкість уламка на виході з перешкоди (заперешкодна швидкість) визначається так :

$$V_\lambda = V \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_*}\right). \quad (5)$$

Якщо виникне така ситуація, далі приймається, що з даною швидкістю уламок починає рухатися від захисної перешкоди в напрямку нафтоховища.

Відносно взаємодії уламка та стінки нафтоховища міркуватимо так. Нехай в момент часу t_w^n , коли уламок «зустріне» стінку об'єкта, швидкість руху уламка дорівнює V_w . Далі приймаємо, що за певний проміжок часу dt , коли має місце взаємодія уламка та стінки об'єкта, швидкість уламку зменшиться до нуля. На ділянку стінки об'єкта, де є взаємодія з уламком, буде діяти сила F_w . Величина цієї сили залежить від зміни «кількості руху» уламка за проміжок часу dt . Це визначається згідно з другим законом Ньютона так:

$$F_w dt = d(mV)$$

або

$$F_w = \frac{d(mV)}{dt}.$$

З урахуванням того, що кінцева швидкість уламка дорівнює нулю, маємо:

$$F_w = \frac{mV_w}{dt}. \quad (6)$$

У прийнятій моделі ця сила прикладена до частини поверхні стінки об'єкта, яка має площу S , тоді уламок при взаємодії зі стінкою створює тиск :

$$p_w = \frac{F_w}{S}. \quad (7)$$

Якщо межа міцності матеріалу стінки об'єкта дорівнює σ , можна записати умову руйнування стінки :

$$p_w \geq \sigma. \quad (8)$$

Безумовно, розглянутий метод визначення тиску, за якого станеться руйнування матеріалу стінки об'єкта, є наближеним. По-перше, площа «взаємодії» уламка та стінки об'єкта може бути значно менша S , тому що уламок має складну геометричну форму та гострі кути. По-друге, потрібно коректно визначити проміжок часу dt (цей час залежить від низки факторів, у першу чергу, властивості матеріалу стінки, уламка тощо).

Чисельне рішення. Розв'язання рівнянь (2), (3) для першої та третьої зон здійснюються чисельним шляхом за допомогою методу Ейлера [7]. Значення компонент швидкості руху уламка u , v на новому часовому шарі « $n+1$ » обчислюється на базі таких залежностей :

$$u^{n+1} = u^n - dt * C_x \frac{\rho_6 V^2}{2m} \cdot S \cdot u, \quad (9)$$

$$v^{n+1} = v^n - dt * C_x \frac{\rho_6 V^2}{2m} \cdot S \cdot v - dt * g \quad (10)$$

Для проведення розрахунку на базі залежностей (9) та (10) потрібно задати кут α вильоту уламка.

Дальність $x(t)$ відльоту уламка від місця вибуху визначається так :

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

де x_0 – координата місця відльоту уламка.

Здійснено програмування чисельної моделі та створено код «Dron». Мова програмування – FORTRAN.

Результати. На базі побудованої чисельної моделі та створеного коду проведено параметричні дослідження з визначення ефективності металеві перешкоди для захисту корпусу нафтоховища від дії уламків (рис. 2).

Розрахунок здійснено за такими даними: коефіцієнт опору уламку 0,47; висота викиду уламка 2 м, зведений діаметр уламка 0,02 м; $\sigma_2 = 4.7 \cdot 10^8$ Па; $\rho_1 = 7\ 800$ кг/м³ – щільність матеріалу уламку; $\rho_2 = 7\ 800$ кг/м³ – щільність матеріалу перешкоди. Як перше наближення будемо розглядати випадок,

коли уламок після вибуху рухається горизонтально в напрямку об'єкта ($\alpha = 0$).

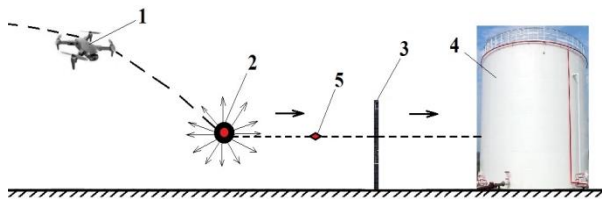


Рис. 2. Розташування габіона на промисловому майданчику: 1 – дрон; 2 – місце вибуху; 3 – захисна перешкода; 4 – нафтосховище; 5 – уламок

Початкова швидкість V_0 сталого уламка після вибуху та товщина перешкоди варіювалися. Рух уламка – горизонтальний від точки вибуху в напрямку захисної перешкоди та нафтосховища. Розрахункова схема задачі показана на рисунку 2. Вибух має місце на відстані 50 м від нафтосховища, захисна перешкода (сталений лист) розташована на відстані 10 м від нафтосховища.

На рисунку 3 показано величину швидкості V_2 уламка біля стінки нафтосховища коли захисною перешкодою слугував сталевий лист товщиною 1 мм.

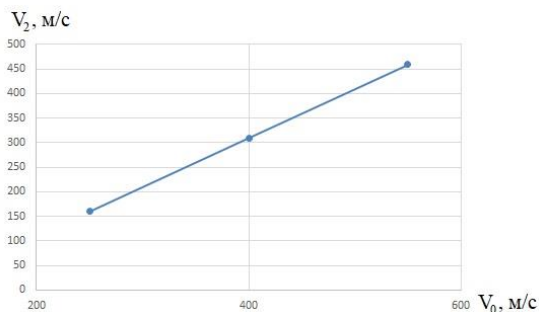


Рис. 3. Швидкість V_2 , з якою уламок стикається зі стінкою нафтосховища залежно від початкової швидкості V_0 уламка (за наявності захисної перешкоди)

Як бачимо з рисунку 3, сталевий лист вибраної товщини не забезпечує зупинку уламка, тобто уламок «проходить» цю перешкоду та продовжує рухатися до нафтосховища. Швидкість уламка V_2 біля стінки нафтосховища дуже велика, що неминуче викличе негативні наслідки.

На рисунку 4 показано мінімальне значення товщини захисної перешкоди для різних значень початкової швидкості руху уламка та при його діаметрі 0,03 м.

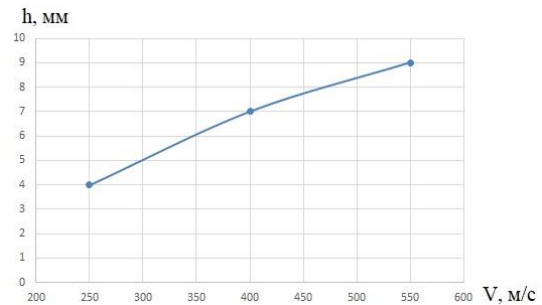


Рис. 4. Показано мінімальне значення товщини захисної перешкоди за різної швидкості уламка

Аналіз даних, наведених на рисунку 4 показує, що в рамках розглянутого діапазону початкової швидкості уламка та його розмірів, захисна металева перешкода, яка має товщину 1 мм, не забезпечує захисту нафтосховища від ураження.

Зазначимо, що час розрахунку складає 0,5 секунди.

Наукова новизна та практична цінність. Розроблено ефективну математичну модель для оцінювання ефективності використання перешкоди для захисту корпусу нафтосховища від ураження уламками дрона. Побудована математична модель базується на чисельному інтегруванні рівняння нестационарного руху матеріальної точки в повітряному просторі та використанні емпіричної моделі для визначення заперешкодної швидкості уламка.

Запропонована модель дозволяє визначати ризик пошкодження стінки нафтосховища за обраній ширині захисної перешкоди.

Висновки

1. Створено багатопараметричну математичну модель руху уламка в повітряному середовищі та в «тілі» металевої перешкоди. Модель базується на використанні другого закону Ньютона та емпіричної моделі.

2. На базі побудованої математичної моделі створено комп'ютерний код для проведення обчислювального експерименту з метою визначення ефективності використання захисних перешкод на території промислового майданчика.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
3. 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.
4. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD-моделювання в аналізі ефективності систем захисту докільця та працівників на робочих місцях: монографія. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
5. Бруацкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Київ : Ін-т гідромеханіки НАН України, 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 Michael Barret. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense : Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectivness. 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*. Vol. 9. 2018. Pp. 38–45.

REFERENCES

1. Basmanov A.E. and Govalenkov S.S. *Ocenka koncentraciji opasnux xymycheskix veshhestv v vozduxe pry nepreruvnoj aktyvnosti istochnyka* [Estimation of the concentration of hazardous chemicals in the air with continuous source activity]. *Problemy nadzvyhajnyx situacij* [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 Prydniprovaska 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 zahystu dokilllya ta pracivnykiv na robochyx misyax : monografiya* [CFD modeling in the analysis of the effectiveness of environmental protection systems and workers at workplaces : monograph]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2022, 443 p. (in Ukrainian).
5. Bruyaczkyj E.V. *Teoriya atmosfernoj diffuzii radioaktivnyh vubrosov* [Theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kyiv : Institute of Hydromechanics NAS of Ukraine, 2002, 443 p. (in Russian).
6. Pshinko A.N., Belyayev N.N. and Mashihina P.B. *Modelirovanie zagryazneniya atmosfery pri tekhnogennyh 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., 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, 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 Effectivness*. 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*. 2018, vol. 9, pp. 38–45.

Надійшла до редакції: 20.02.2024.