

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 621.6.033:621.642-049.65

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1</sup>, І. В. КАЛАШНІКОВ<sup>2</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>3\*</sup>, В. А. КОЗАЧИНА<sup>4</sup>,  
В. М. ПОЛТОРАЦЬКА<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2</sup>Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту», АТ «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3</sup>Каф. охорони праці, цивільної та промислової безпеки, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 247 16 01, ел. пошта berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>4\*</sup>Каф. «Гідравліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, , 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup>Каф. екології та охорони навколишнього середовища, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 71, ел. пошта poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-6244-8439

### Використання габіонів для захисту від ураження нафтоховища

**Мета.** Під час вибуху дрона утворюють уламки, що спричиняють ризик ураження як людини, так і об'єктів на промисловому майданчику. Тому основною метою роботи є оцінювання ефективності використання габіонів із різними наповнювачами для зменшення ризику ураження стінки нафтоховища уламками, що з'являються під час вибуху дрона на промисловому майданчику, а також аналіз величини позаперешкодної швидкості руху уламків. **Методика.** Для аналізу ефективності використання габіонів як захисних споруд нафтоховища під час розлітання уламків дрона використано чисельну модель, що базується на інтегруванні рівняння руху матеріальної точки. Рівняння руху уламка базуються на другому законі Ньютона. Такий підхід дозволяє визначити позаперешкодну швидкість уламка після проходження тіла захисної перешкоди – габіону. Побудована чисельна модель враховує початкову швидкість уламка, його розмір, напрям руху, висоту викиду, а також матеріал, яким наповнено тіло габіону. На базі цієї чисельної моделі створено комп'ютерну програму для проведення обчислювального експерименту. **Результати.** Розроблено ефективний інструмент аналізу ризику ураження нафтоховища від металюї дії уламків, що утворюються в разі вибуху дрона, та аналізу ефективності використання габіонів. Подано результати обчислювальних експериментів. **Наукова новизна.** Побудовано швидкорозрахункову чисельну модель для оперативного аналізу ефективності використання габіонів, які мають різне наповнення та які використовують для захисту нафтоховища на промисловому майданчику від металюї дії уламків, що утворюються під час вибуху дрона. **Практична значимість.** Розроблено комп'ютерну програму для розрахунку динаміки руху уламків у повітрі та в тілі габіону. Використання цієї програми дозволяє підібрати раціональні розміри захисної перешкоди – габіону на промисловому майданчику для захисту нафтоховища від ураження.

*Ключові слова:* габіон; розлітання уламків; ризик ураження; динаміка руху уламка; чисельне моделювання

#### Вступ

У разі екстремальних ситуацій на промислових майданчиках можлива поява різних вражаючих факторів, наприклад, поява в повітрі токсичних речовин, створення вогняної кулі

тощо [1, 7–10]. Для оцінювання наслідків таких екстремальних ситуацій використовують різні математичні моделі [2–4, 8, 9]. У випадку вибухів на промисловому майданчику має місце розлітання уламків, які створюють ризик ураження персоналу та об'єктів через їх рух зі знач-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ною швидкістю. Якщо в таких місцях розташовані сховища нафтопродуктів, то уламки, що утворюються під час вибуху, можуть пошкодити корпус нафтосховища. Це призведе до вилиття продуктів, пожежі на промисловому майданчику, викиду в атмосферне повітря продуктів пожежі та появи теплового забруднення довкілля. Таким чином, дуже важливо розробляти засоби захисту нафтосховищ у разі розлітання уламків під час вибухів дронів. Це дає підстави для проведення наукових досліджень з метою вдосконалення систем захисту нафтосховищ на промислових майданчиках у разі розлітання уламків.

### Мета

Основною метою роботи є оцінювання ефективності використання габіону з різним наповненням для зниження ризику ураження нафтосховища уламками, що утворюються після вибуху.

### Методика

Розглядаємо задачу розлітання уламків від вибуху дрона на промисловому майданчику, де розташовані нафтосховища. Для захисту корпусу нафтосховища від металевих уламків пропонуємо використати габйон з різним наповненням. Для розв'язання цієї задачі використовуємо побудовану чисельну модель.

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

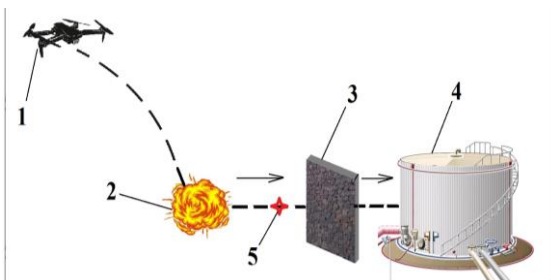


Рис. 1. Розташування габіону на промисловому майданчику:

1 – дрон; 2 – місце вибуху; 3 – габйон;  
4 – нафтосховище; 5 – уламок

Fig. 1. Location of the gabion on the industrial site:

1 – drone; 2 – place of explosion; 3 – gabion;  
4 – oil storage; 5 – fragment

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 (габйон) робимо такі припущення:

- 1) уламок має форму конуса;
- 2) маса уламка – відома;
- 3) швидкість та напрям руху уламка від точки вибуху – відомі;
- 4) відома довжина від місця розлітання уламків до габіону та об'єкта;
- 5) кут  $\alpha$  вилітання уламка відносно поверхні землі – відомий;
- 6) відома щільність  $\rho_{ст}$  матеріалу захисної перешкоди (габіону).

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

- зона № 1 – від місця вибуху до габіону;
- зона № 2 – рух уламка всередині габіону з піском;
- зона № 3 – рух уламка від габіону до об'єкта (якщо уламок пройде зону № 2).

Динаміку руху уламка в кожній 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;

$F_R = C_x \frac{\rho_B V^2}{2} \cdot S$  – сила опору уламка;  $C_x$  – коефіцієнт опору уламка;  $\rho_B$  – щільність середовища;  $S$  – площа мідельового перерізу уламка;  $t$  – час.

Слід відзначити, що значення коефіцієнта опору  $C_x$  для другої зони (рух уламка в піску) відрізняється від значення цього коефіцієнта для першої та третьої зон (рух уламка в повітрі).

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

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

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

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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

Далі здійснюємо чисельне інтегрування рівнянь (2) і (3) для визначення швидкості руху уламка в кожній зоні. Коефіцієнт опору  $C_x$  для першої та третьої зони беремо 0,5, для другої зони – 0,85 (С.І. Герасімов, В.І. Єрофєєв та інші).

Для розв'язання моделювальних рівнянь (2) і (3) використовуємо метод Ейлера [5]. Розрахунок значень компонент швидкості руху уламка  $u$ ,  $v$  на новому часовому відрізку « $n+1$ » здійснюємо на базі таких залежностей:

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

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

Для проведення розрахунку на базі залежностей (9) і (10) потрібно задати кут  $\alpha$  вилітання уламка.

Дальність  $x(t)$  відлітання уламка від місця вибуху визначаємо з виразу:

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

де  $x_0$  – координата місця відлітання уламка.

Здійснено програмування чисельної моделі та створено код «Drone–2N». Мова програмування – FORTRAN. Код дає інформацію про швидкість руху уламка до габіону, усередині габіону та за габіоном. Беремо, що якщо за габіоном (тобто уламок прошив тіло габіону) позаперешкодна швидкість уламка  $V_b$  не перевищує 0,2 м/с, то габіон працює ефективно. Але цей критерій є достатньо умовним.

### Результати

На базі побудованої чисельної моделі та створеного коду проведено параметричні дослідження. Визначено ефективність використання габіону для двох сценаріїв:

– перший сценарій: тіло габіону – мокрий пісок, щільність  $\rho = 1\,920$  кг/м<sup>3</sup>;

– другий сценарій: тіло габіону містить різні наповнювачі – тирса деревна, макуха, земля суха.

Як перше наближення розглянуто випадок, коли уламок після вибуху рухається горизонтально в напрямку об'єкта ( $\alpha = 0$ ).

Таблиця 1

#### Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 1, маса уламка 0,03 кг)

Table 1

#### The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 1, the mass of the fragment is 0.03 kg)

Початкова швидкість уламка, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,08	0,96
500	0,08	1,05
800	0,08	1,10

Розрахунок для першого варіанта здійснено за таких даних: вибух має місце на відстані 25 м від нафтосховища, захисна перешкода розташована на відстані 12 м від нафтосховища. Висота викиду уламка 2 м, маса уламка 0,03 та 0,07 кг. Початкова швидкість уламка варіюється. Результати розрахунку для цих параметрів показані в табл. 1 і 2.

Таблиця 2

#### Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 1, маса уламка 0,07 кг)

Table 2

#### The value of the debris velocity beyond the obstacle (Scenario 1, the mass of the fragment is 0.07 kg)

Початкова швидкість уламка, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,18	2,01
500	0,19	2,25
800	0,19	2,37

Аналіз даних із табл. 1 і 2 показує, що для уламка масою 0,03 кг товщина габіону порядку 1,1 м, із цим наповнювачем, може бути ефективною. Для уламка масою 0,07 кг ефективною є товщина габіону порядку 2,4 м.

Для другого сценарію задачі щільність наповнювача габіону була така:

– тирса деревна  $\rho = 400$  кг/м<sup>3</sup>;

– макуха  $\rho = 590$  кг/м<sup>3</sup>;

– земля суха  $\rho = 1\,100$  кг/м<sup>3</sup>.

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Розрахунок для другого сценарію здійснено за таких даних: маса уламка 0,02 кг. Початкова швидкість уламка варіюється. Результати розрахунку для цих параметрів показано в табл. 3 – 5.

Таблиця 3

**Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 2, тирса деревна)**

Table 3

**The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 2, wood sawdust)**

Початкова швидкість уламка, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,16	2,65
500	0,25	2,98
800	0,25	3,15

Таблиця 4

**Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 2, макуха)**

Table 4

**The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 2, oilcake)**

Початкова швидкість уламку, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,17	1,89
500	0,17	2,11
800	0,17	2,22

Таблиця 5

**Значення позаперешкодної швидкості уламка (сценарій 2, земля суха)**

Table 5

**The value of the debris velocity beyond the obstacle (scenario 2, the ground is dry)**

Початкова швидкість уламку, м/с	Позаперешкодна швидкість, $V_b$ , м/с	Товщина габіону, м
200	0,09	1,09
500	0,09	1,21
800	0,09	1,26

Як бачимо з табл. 3 – 5, на ефективність затримання уламка суттєво впливає щільність матеріалу в тілі габіону. Так, якщо використано тирсу деревну, то для розглянутих параметрів товщина габіону порядку 3 м неефективна. Для сухої землі як наповнювача можна використовувати габіон товщиною порядку 1,3 м.

Відзначимо, що час розрахунку складає 2 с.

**Наукова новизна та практична значимість**

Запропоновано чисельну модель для оцінювання ефективності використання габіону, який має різне наповнення. Габіон використовують на промисловому майданчику для захисту корпусу нафтоховища від ураження уламками дрона.

Математична модель базується на чисельному інтегруванні рівняння нестационарного руху матеріальної точки в повітряному просторі та в тілі габіону для визначення позаперешкодної швидкості уламка.

Розроблена чисельна модель дозволяє визначити раціональні розміри габіону для зниження ризику пошкодження стінки нафтоховища.

**Висновки**

1. Створено багатопараметричну математичну модель руху уламка в повітряному середовищі та в «тілі» габіона.

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

3. Проведено обчислювальний експеримент, що дав можливість визначити раціональну товщину габіону, для заповнення якого використано пісок, тирсу деревну, макуху та землю суху.

## 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. Бруяцкий Е. В. *Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов*. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наукова думка, 1997. 368 с.
5. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Al-Zghoul B. M., Abu-El-Sha`r W. Y. New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*. 2020. Vol. 20. Iss. 1. P. 119–127. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0433>
7. Barret A. M. *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness* : Dissertation. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2009. 123 p.
8. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2011. P. 87–91. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15)
9. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*. 2018. Vol. 16, No 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
10. Tseng J. M., Su T. S., Kuo C. Y. Consequence evaluation of toxic chemical releases by ALOHA. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 45. P. 384–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.175>
11. Zavila O., Dobes P., Dlavka J., Bitta J. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The science for population protection*. 2015. Vol. 2. P. 1–9.

M. M. BILIAIEV<sup>1</sup>, I. V. KALASHNIKOV<sup>2</sup>, O. V. BERLOV<sup>3\*</sup>, V. A. KOZACHYNA<sup>4</sup>,  
V. M. POLTORATSKA<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport», JSC «Ukrainian Railway», Kotliar St., 7, Kharkiv, Ukraine, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

<sup>3\*</sup>Dep. of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, Architect Oleg Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>4</sup>Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

<sup>5</sup>Dep. of Ecology and Environmental Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, Architect Oleg Petrov St., 24-a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38(056) 756 33 71, e-mail poltoratskaya.viktoriya@pdaba.edu.ua, ORCID 0000-0002-6244-8439

## Using Gabions to Protect Oil Storage Facilities from Damage

**Purpose.** During a drone explosion, debris is generated that poses a risk of damage to both humans and objects at an industrial site. Therefore, the main purpose of this study is to evaluate the effectiveness of using gabions with different fillers to reduce the risk of damage to the wall of an oil storage facility by debris generated during a drone explosion at an industrial site, as well as to analyze the value of the out-of-band velocity of the debris. **Methodology.** A numerical model based on the integration of the equation of motion of a material point was used to analyze the effectiveness of using gabions as protective structures of an oil storage facility during the flying of drone debris. The equations of motion of the debris are based on Newton's second law. This approach makes it possible to determine the unobstructed velocity of the fragment after passing the body of the protective barrier - the gabion. The developed numerical model takes into account the initial velocity of the fragment, its size, direction of movement,

ejection height, and the material that fills the gabion body. On the basis of this numerical model, a computer program was created to conduct a computational experiment. **Findings.** An effective tool has been developed to analyze the risk of damage to the oil storage facility from the metallic impact of debris generated in the event of a drone explosion and to analyze the effectiveness of gabions. The results of computational experiments are presented. **Originality.** A fast-calculating numerical model has been built for the operational analysis of the efficiency of using gabions with different contents, which are used to protect an oil storage facility at an industrial site from the missile impact of debris generated by a drone explosion. **Practical value.** A computer program has been developed to calculate the dynamics of debris movement in the air and in the body of the gabion. The use of this program makes it possible to select the rational dimensions of a protective barrier - gabion at an industrial site to protect an oil storage facility from damage.

*Keywords:* gabion; debris scattering; risk of damage; dynamics of debris movement; numerical modeling

## REFERENCES

1. Basmanov, A. Ye., & Govalenkov, S. S. (2010). The concentration of hazardous chemicals in the air at a continuous activity of the source. *Problems of Emergency Situations*, 12, 21-27. (in Russian)
2. Berlyand, M. Ye. (1985). *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)
3. Bruyatskiy, Ye. V. (2000). *Teoriya atmosfernoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. Kyiv : Institute of Hydromechanics NAS of Ukraine. (in Russian)
4. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
5. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem*. Moscow: Nauka Publ. (in Russian)
6. Al-Zghoul, B. M., & Abu-El-Sha'r, W. Y. (2020). New Gaussian Plume Equation for the Impacts of Dust Storms on Radionuclide Transport. *Aerosol and Air Quality Research*, 20(1), 119-127. DOI: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0433> (in English)
7. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburg. (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. In *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security* (pp. 87-91). DOI: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15) (in English)
9. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) - APEIRON*, 16(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in English)
10. Tseng, J. M., Su, T. S., & Kuo, C. Y. (2012). Consequence Evaluation of Toxic Chemical Releases by ALOHA. *Procedia Engineering*, 45, 384-389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.175> (in English)
11. Zavila, O., Dobes, P., Dlavka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The science for population protection*, 2, 1-8. (in English)

Надійшла до редколегії: 20.02.2024

Прийнята до друку: 29.06.2024