

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5:[621.565.8:519.87]

Л. В. АМЕЛІНА^{1*}, М. М. БІЛЯЄВ^{2*}, О. В. БЕРЛОВ^{3*}, Л. А. ЧЕРЕДНИЧЕНКО^{4*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

^{2*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Каф. «Безпека життєдіяльності», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{4*}Каф. «Безпека життєдіяльності», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта cherednichenko@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-1457-9282

ОЦІНКА РИЗИКУ УРАЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО

Мета. Ця робота передбачає розробку чисельної моделі для розрахунку зон хімічного забруднення у разі аварійної емісії аміаку на території насосної станції, що здійснює перекачування, а також розробку моделі оцінки ризику ураження та глибини рани в тілі у випадку розлітання уламків, що утворюються під час вибуху трубопроводу. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі – визначення зон поширення аміаку в атмосферному повітрі – використано рівняння масопереносу. Для розрахунку поля швидкості повітряного потоку за наявності будівель на території насосної станції, що перекачує аміак, використано модель потенціальної течії. Чисельне розв'язання тривимірного рівняння для потенціалу швидкості проведено за допомогою методу сумарної апроксимації. Під час використання цієї чисельної моделі враховано нерівномірне поле швидкості вітрового потоку, зміну вертикального коефіцієнта атмосферної дифузії з висотою, інтенсивність емісії аміаку, місце викиду хімічно небезпечної речовини. Для чисельного розв'язання рівняння переносу аміаку в атмосферному повітрі використано різницеву схему розщеплення. Попередньо здійснено фізичне розщеплення тривимірного рівняння масопереносу на систему рівнянь, що описують перенос забруднювача в одному координатному напрямку. На кожному кроці розщеплення невідоме значення концентрації аміаку визначено за явною схемою біжучого рахунку. Розглянуто математичну модель розрахунку розлітання уламків під час вибуху на території насосної станції. **Результати.** На основі розробленої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря на території насосної станції, що перекачує аміак. Визначено зону можливого ураження людей у разі розлітання уламків під час вибуху на території станції. **Наукова новизна.** Розроблено чисельну модель, що дозволяє розраховувати зони хімічного зараження в разі аварійної емісії аміаку на території насосної станції. Модель доповнено оцінкою зон ураження у випадку розлітання уламків під час вибуху. **Практична значимість.** На базі розробленої математичної моделі створено комп'ютерну програму, що дозволяє проводити серійні розрахунки для визначення зон ураження під час надзвичайних ситуацій на території хімічно небезпечних об'єктів. Розроблена математична модель може бути використана під час складання плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС) для хімічно небезпечних об'єктів.

Ключові слова: хімічне забруднення атмосфери; аварійна емісія; математичне моделювання

Вступ

Емісія хімічно небезпечних речовин під час аварій на промислових об'єктах створює загрозу життю працівників цих підприємств та населення. У зв'язку з цим украй важливою проблемою є оцінка ризику ураження людей у разі таких техногенних аварій. Для розв'язання задач цього класу ряд параметрів мають суттєво вірогідний характер – наприклад, інтенсивність емісії хімічно небезпечної речовини. Це спонукає поряд із математичними моделями, що мають детермінований характер, використовувати моделі, які відображають вірогідність того чи іншого параметра. Тому практичний інтерес має науковий напрям розробки математичних моделей прогнозування рівня забруднення навколишнього середовища у випадку аварійної емісії хімічно небезпечних речовин, що дозволяє певним чином урахувати ймовірність ряду параметрів, що впливають на формування зон хімічного зараження.

Для оцінки ризику ураження людей на хімічно небезпечних об'єктах [1, 2, 4, 6–9] використовують, як правило, два підходи – це модель Гауса або нормативна методика, яку застосовують у Державній службі України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). На базі цих підходів можна швидко визначити розмір зон хімічного зараження, але вони мають ряд суттєвих недоліків, наприклад, не враховують вплив будівель. У зв'язку з цим актуальною задачею є створення математичних моделей, що дозволяють оперативно визначати розміри зон хімічного зараження та ризик ураження людей [10–13]. Ризик хімічного ураження визначають як зону, де концентрація хімічно небезпечної речовини перевищує гранично допустиму концентрацію (ГДК).

Мета

Основною метою роботи є розробка чисельної моделі для оперативного прогнозування зон хімічного зараження в разі аварійної емісії аміаку на території насосної станції, а також розробка моделі оцінки ризику ураження та глибини рани у випадку розлітання уламків, що утворюються під час вибуху трубопроводу.

Методика

Емісія хімічно небезпечних речовин може призвести до вкрай негативного наслідку – смертельного ураження людей (працівники на території промислового об'єкта, населення). Можливість смертельного ураження людей залежить від багатьох факторів, визначальним серед яких є маса хімічно небезпечної речовини, що потрапляє в атмосферне повітря. Як відомо, ця величина носить вірогідний характер. Але межі маси викиду для тих чи інших об'єктів можуть бути встановлені на основі аналізу наявних статистичних даних. Для визначення маси хімічно небезпечної речовини на деякому промисловому об'єкті (наприклад, насосна станція, що перекачує аміак) можна використовувати метод Монте-Карло. У цьому випадку методологія оцінки ризику ураження буде полягати в наступному:

1. Здають межі можливого викиду хімічно небезпечної речовини на промисловому об'єкті, що відомі з експертних оцінок (M_1 – мінімальна відома маса речовини, M_2 – максимальна відома маса речовини).

2. Визначають найбільш вірогідну масу хімічно небезпечної речовини Q_0 , що може потрапити в атмосферне повітря у випадку можливої аварійної ситуації.

3. Визначають зону забруднення атмосферного повітря в разі викиду хімічно небезпечної речовини в кількості Q_0 . У цій зоні виділяють підзону, де концентрація хімічно небезпечної речовини перевищує граничне значення (наприклад, смертельну концентрацію).

4. Визначають кількість людей N , що потрапили в підзону, де прогнозується смертельна концентрація хімічно небезпечної речовини.

Таким чином, розв'язання задачі складається з двох основних етапів:

перший – розрахунок можливої інтенсивності викиду хімічно небезпечної речовини за методом Монте-Карло;

другий – розрахунок зон хімічного зараження місцевості з визначенням підзон смертельного ураження людей.

Для оцінки рівня хімічного забруднення атмосферного повітря будемо використовувати тривимірне рівняння масопереносу [2, 3, 5]:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} + \sigma C = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_0(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (1)$$

де C – концентрація аміаку; u, v, w – компоненти вектора швидкості вітрового потоку; $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i)$ – дельта-функція Дірака; $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$ – коефіцієнти турбулентної дифузії; x_i, y_i, z_i – координати джерела викиду аміаку; σ – коефіцієнт, що враховує хімічний розпад домішки, вимивання опадами; Q – інтенсивність викиду аміаку; w_g – швидкість гравітаційного осідання домішки; t – час.

Крайові умови для рівняння масопереносу розглянуті в [5].

Під час проведення розрахунків будемо враховувати нерівномірність вертикального коефіцієнта дифузії та швидкості повітря по висоті:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^p, \quad \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m; \\ \mu_x = \mu_y = k_0 u, \quad (2)$$

де $p = 0,15$; $m = 1$; $k_1 = 0,2$; $k_0 = 0,1 \div 1$.

Для чисельного інтегрування рівняння (1) будемо використовувати скінченно-різницеви методи [5]. Попередньо здійснюємо розщеплення рівняння (1) на послідовність розв'язання наступних рівнянь:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right);$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = \sum Q_0(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (3)$$

Для чисельного інтегрування рівнянь (3) використовуємо поперемінно-трикутну різницеву схему [5] та метод Ейлера.

Для математичного моделювання поля вітрового потоку на території промислового об'єкта використовуємо модель потенціальної течії. Розрахунок здійснюємо на базі рівняння [5]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

де P – потенціал швидкості.

Компоненти швидкості повітряного потоку визначаємо так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (5)$$

Граничні умови для рівняння (4) такі:

- 1) $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ на непроникливих границях та на верхній поверхні розрахункової області;
- 2) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ на границі, де потік входить у розрахункову область, V_n – відома швидкість повітря;
- 3) $P = \text{const}$ – на границі виходу потоку з розрахункової області.

Для чисельного розв'язання рівняння (4) використовуємо метод сумарної апроксимації, тому це рівняння зводимо до вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (6)$$

де t – фіктивний час.

Розрахункову залежність для визначення потенціалу швидкості записуємо в такому вигляді на двох кроках розщеплення:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta t} = \frac{-P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k}^{n+1/2} - P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}; \quad (7)$$

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1/2}}{\Delta t} = \frac{-P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i+1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1} + P_{i,j,k+1}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+1} + P_{i,j,k+1}^{n+1}}{\Delta z^2}.$$

Розрахунок за цією формулою припиняється в разі виконання умови:

$$|P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n| \leq \varepsilon,$$

де n – номер ітерації (кількість кроків за «часом»); ε – мале число.

Компоненти вектора швидкості визначаємо на гранях різницевих комірок так:

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x}; \quad v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y};$$

$$w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}. \quad (8)$$

На базі розглянутих різницевих рівнянь була створена комп'ютерна програма, яка включає кілька підпрограм:

- 1) підпрограма розрахунку поля потенціалу швидкості;
- 2) підпрограма розрахунку поля швидкості повітря в умовах забудови;
- 3) підпрограми розрахунку концентрації домішки в повітрі для різних моментів часу після аварійного викиду.

Для зручності користування програмою відокремлено файл початкових даних. Користувач вносить у цей файл дані щодо розташування будівель на території насосної станції, місця аварійного викиду, інтенсивності викиду та інші параметри.

Для кодування різницевих рівнянь використано Фортран.

Результати

Розроблену чисельну модель було використано для розрахунку зони хімічного зараження в разі аварійного викиду аміаку на насосній станції, що розташована біля с. Башмачка (рис. 1). На основі аналізу експертних даних визначено, що аварійний викид аміаку може бути в діапазоні 200–500 кг. На основі методу Монте-Карло розраховано, що в рамках цього

діапазону найбільша вірогідність аварійної емісії аміаку (19 %) відповідає викиду в 300 кг. Тому для при проведення обчислювального експерименту було взято цей викид. Оскільки існує певна інертність у зупинці насосів, то зрозуміло, що викид буде мати місце протягом короткого часу, тому взято, що викид триватиме 3 с, тобто ми маємо напівбезперервний викид.

Розрахунок виконано на базі двох підходів. Перший – розрахунок тільки на базі кінематичної моделі (1). Другий – розрахунок на базі двох моделей: моделі аеродинаміки (4) та моделі масопереносу (1). Тобто для першого розрахунку не враховано розташування будівель на території насосної станції. Для другого розрахунку враховано наявність будівель на території насосної станції.



Рис. 1. Розрахункова схема:

1 – місце викиду хімічно небезпечної речовини на насосній станції; 2 – позиція рецептора



Рис. 2. Зона забруднення атмосферного повітря (не враховано вплив будівель на формування зони забруднення, рівень $z = 2,5\text{ м}$, $t = 35\text{ с}$)

На рис. 2 показано зону хімічного зараження атмосферного повітря на території насосної станції, де має місце витік аміаку, коли розрахунок виконано лише на базі кінематичної моделі. Ми бачимо, що зона хімічного зараження

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

має вигляд «краплі», ніде не виявлено деформації цієї зони.

На рис. 3 показано прогнозну зону хімічного зараження, для визначення якої у розрахунках враховано розташування будівель на території насосної станції.



Рис. 3. Зона забруднення атмосферного повітря, розрахунок виконано з урахуванням будівель на території насосної станції (рівень $z = 2,5\text{ м}$, $t = 35\text{ с}$)

Порівнявши рис. 3 та 2, ми бачимо суттєву різницю, а саме деформацію зони хімічного зараження внаслідок впливу будівель на процес поширення токсичної речовини в повітрі.

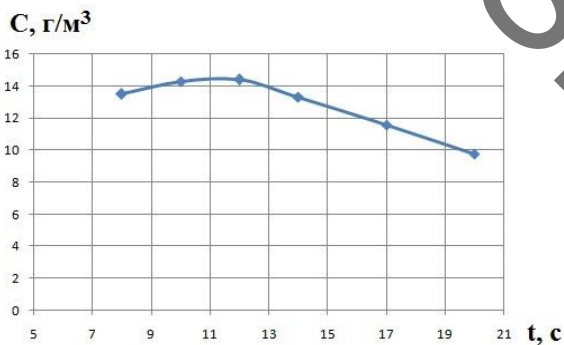


Рис. 4. Зміна концентрації хімічно небезпечної речовини в точці розташування рецептора

На рис. 4 показано динаміку зміни концентрації аміаку на промисловому майданчику біля будівлі (рис. 1, позиція рецептора 2).

Як бачимо з рис. 4, у випадку аварійної емісії аміаку концентрація його на промисловому майданчику, біля промислової будівлі, буде суттєво перевищувати ГДК ($\text{ГДК} = 20\text{ мг/м}^3$), тобто буде мати місце ризик токсичного ураження людей на об'єкті. Відзначимо, що час розрахунку становить 5 с.

На другому етапі досліджень було оцінено ризик ураження людей у разі розлітання уламків унаслідок вибуху на території насосної ста-

нції, що перекачує аміак. Наприклад, такий вибух може мати місце на трубопроводах, що розташовані на території насосної станції (рис. 5).



Рис. 5. Трубопроводи на території насосної станції для перекачування аміаку (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Аммиакопровод>)



Рис. 6. Схема розлітання уламків

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Зону ураження визначено за дальністю розлітання уламків трубопроводу. Для моделювання процесу польоту уламка в повітрі використано другий закон Ньютона динаміки руху матеріальної точки. У векторному вигляді для уламка, що має масу m , динаміка руху моделюється рівнянням:

$$m \frac{dV}{dt} = -F_R - F_g, \quad (9)$$

де V – вектор швидкості польоту уламка;

$F_g = mg$ – сила тяжіння; $F_R = C_x \frac{\rho_g V^2}{2} \cdot S$ – сила опору; C_x – коефіцієнт опору; ρ_g – щільність повітря; S – площа міделевого перерізу.

Уламок, що утворюється під час вибуху, має складну геометричну форму. Для застосування моделі (9) виконуємо наступну процедуру. По-перше, визначаємо об'єм уламка. Далі візьмемо, що такий об'єм має «приведена куля» із радіусом R . Тоді знаючи, що об'єм уламка дорівнює W , ми знаходимо радіус «приведеної

кулі» з виразу $W = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3$: $R = \sqrt[3]{\frac{3W}{4\pi}}$.

Далі, знаючи масу матеріалу уламка та початкову його швидкість, проводимо розрахунки на базі моделі (9). Попередньо векторне рівняння (9) записуємо в проєкціях на вісі X , Y (вісь Y направлена вертикально вгору):

$$m \frac{du}{dt} = -C_x \frac{\rho_g V^2}{2} \cdot S \cdot u; \quad (10)$$

$$m \frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_g V^2}{2} \cdot S \cdot v - mg. \quad (11)$$

Масу уламка визначаємо так: $m = \rho_{cm} \cdot W$, де ρ_{cm} – щільність матеріалу уламка.

Для чисельного інтегрування рівнянь (10) – (11) використано метод Ейлера. Міделів переріз розраховано так:

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

де $d = 2R$.

Для проведення розрахунків за початкові дані слід задати також кут вильоту уламка (рис. 6, кут α).

Нижче на рисунку наведена зона можливого ураження людини в разі викиду уламка сталі, що має приведений діаметр 1 см. Передбачено, що викид уламка відбувається на висоті 2 м. Початкова швидкість уламка взята 150 м/с. Важливим параметром для оцінки зон ураження в разі викиду уламків є визначення кута, під яким уламок виходить із зони вибуху (рис. 6, кут α). Діапазон кута розлітання може бути різний. У роботі розглянуто діапазон вильоту уламка $0^\circ \div 90^\circ$. Методом Монте-Карло було визначено, що діапазону вильоту уламка $\alpha \approx (15^\circ \div 30^\circ)$ відповідає найбільша вірогідність – 37%. На рис. 7 подано результати розрахунку для кута вильоту $\alpha = 30^\circ$.



Рис. 7. Зона ураження у випадку розлітання уламків після вибуху на насосній станції, що перекачує аміак

Як бачимо з рис. 7, цей уламок може досягнути межі селищ Башмачка та Калинівка. Тобто створюється загроза ураження людей, що знаходяться на достатньо великій відстані від насосної станції.

Крім цієї моделі, була також побудована модель руху уламка в тілі тварини, яка опинилася в зоні ураження (рис. 8).

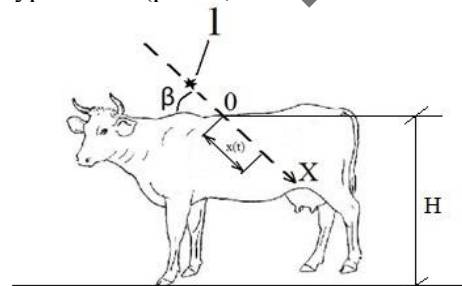


Рис. 8. Схема ураження тварини уламком: 1 – уламок у польоті

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Швидкість уламка перед «перешкодою», тобто тілом, визначаємо на базі розв'язання рівнянь (10) – (11). Уламок «зустрічає» тіло тварини (людини) під кутом β (рис. 8), який можна розрахувати в процесі розв'язання рівнянь (10) – (11), на базі визначених значень компонент швидкості руху u , v та для конкретної висоти H знаходження уламка над поверхнею землі. Висоту H задаємо. Далі починається рух уламка в тілі. Цей процес моделюємо таким рівнянням руху матеріальної точки (другий закон Ньютона):

$$m \frac{dV}{dt} = -F_R, \quad (12)$$

де V – вектор швидкості руху уламка в тілі тварини (людини); F_R – сила опору; m – маса уламка.

Вибираючи координатну вісь Ox в напрямку руху уламка в тілі, можна записати рівняння руху (12) в проекції на цю вісь:

$$m \frac{dV}{dt} = -C_x \frac{\rho_m V^2}{2} \cdot S, \quad (13)$$

де C_x – коефіцієнт опору; ρ_m – щільність м'язової частини тіла; S – площа міделевого перерізу. Для проведення розрахунків узято, що $\rho_m = 1066 \text{ кг/м}^3$.

Чисельне розв'язання цього рівняння проводимо за методом Ейлера. Розрахункову залежність для визначення значення швидкості уламка в тілі (на новому часовому кроці $n+1$), за методом Ейлера, визначаємо таким чином:

$$V^{n+1} = V^n - dt \cdot C_x \frac{\rho_m V^2}{2m} \cdot S. \quad (14)$$

За допомогою цієї різницевої залежності визначаємо швидкість руху уламка в тілі тварини на кожному часовому кроці. Глибина проникнення уламка в тіло $x(t)$ (рис. 8), на кожному часовому кроці, визначаємо так:

$$x(t) = x_0 - dt \cdot V, \quad (15)$$

де $x_0 = 0$ – відповідає початковій точці тіла тварини, тобто місце, де уламок входить у тіло

(рис. 8); $x(t)$ – нове положення уламка в тілі тварини внаслідок його руху.

Слід відзначити, що залежність (15) дає можливість оцінювати розміри рани в тілі, тобто в першому наближенні визначати важкість ураження тварини або людини.

У табл. 1 наведено дані щодо визначення глибини проникнення уламка в тіло тварини для зони ураження 1 239 м. Для розрахунку розмірів рани в тілі за розрахункову взято висоту $H = 1,6 \text{ м}$. Тобто дані щодо кута входження уламка в тіло та його швидкості польоту на цій висоті були початковими для розрахунку руху уламка в тілі. Відзначимо, що час $t = 0$ відповідає моменту удару уламка об тіло.

Таблиця 1

Глибина проникнення уламка в тіло (відстань 1 239 м від місця вибуху газоповітряної суміші)

Час	0,001 с	0,003 с	0,007 с	0,020 с	0,030 с
x	0,09 м	0,24 м	0,43 м	0,77 м	0,92 м

Із табл. 1 ми бачимо, що приблизно за 0,03 с в тілі тварини буде наскрізна рана.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено математичну модель, що дозволяє розраховувати зони хімічного зараження в разі аварійної емісії аміаку на території станції перекачування. Модель дозволяє проводити прогностичні розрахунки з урахуванням впливу будівель на формування зон хімічного зараження. Також запропоновано модель для розрахунку розмірів зон ураження у випадку розлітання уламків, що утворюються під час вибуху суміші «аміак + повітря». Цю модель доповнено моделлю руху уламка в тілі тварини (людини).

Модель може бути використана під час розробки плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС) із метою визначення зон ризику.

Висновки

1. Запропоновано чисельну модель для прогнозування зон хімічного зараження на території промислових об'єктів у разі аварійної емісії хімічно небезпечних речовин.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

2. Розроблено експрес-модель оцінки ризику ураження у випадку розлітання уламків унаслідок вибуху на промисловому об'єкті.

3. Виконано оцінку рівня забруднення повітря у разі аварійної емісії аміаку на території станції перекачування.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алымов, В. Т. Техногенный риск. Анализ и оценка : учеб. пособие для вузов / В. Т. Алымов, Н. П. Тарасова. – Москва : Академкнига, 2004. – 118 с.
2. Беляев, Н. Н. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, Н. В. Росточило. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – 136 с.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
4. Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. С. Кириченко, Л. Я. Мунтян. – Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. – 127 с.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Barret, A. M. Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness : Degree of Doctor of Philosophy / Anthony Michael Barret ; Carnegie Mellon University. – Pittsburg, Pennsylvania, 2009. – 123 p.
7. Berlov, O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo / O. V. Berlov // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 48–54. doi: 10.15802/stp2016/60953
8. Biliaiev, M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. M. Biliaiev, M. M. Kharytonov // NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. – Dordrecht, 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations [Електронний ресурс] // Croner-i. – Режим доступу: <http://clc.am/OnkmUw> – Назва з екрана. – Перевірено : 08.11.2019
10. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility / A. Tumanov, V. Gumenyuk, V. Tumanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 90. – P. 1–11. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027
11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Z. Naserzadeh, F. Atabi, F. Moattar, N. Moharram Nejad // Bioscience Biotechnology Research Communication. – 2017. – Vol. 10 (1). – P. 192–204.
12. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain / C. Cao, C. Li, Q. Yang, F. Zhang // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. – P. 1–22. doi: 10.3390/su9112103
13. Protective Action Criteria. A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations [Електронний ресурс] // Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. – Edmonton, Alberta, 2017. – Режим доступу: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Назва з екрана. – Перевірено : 08.11.2019
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / O. Zavla, P. Dobes, J. Dlabka, J. Bitta // The Science for Population Protection. – 2015. – No. 2. – P. 1–9.

Л. В. АМЕЛИНА^{1*}, Н. Н. БЕЛЯЕВ^{2*}, А. В. БЕРЛОВ^{3*}, Л. А. ЧЕРЕДНИЧЕНКО^{4*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

^{2*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{4*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта cherednichenko@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-1457-9282

ОЦЕНКА РИСКА ПОРАЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

Цель. Данная работа предусматривает разработку численной модели для расчета зон химического загрязнения в случае аварийной эмиссии аммиака на территории насосной станции, осуществляющей перекачку, а также разработку модели оценки риска поражения и глубины раны в теле при разлете осколков, образовавшихся во время взрыва трубопровода. **Методика.** Для решения поставленной задачи – определения зон распространения аммиака в атмосферном воздухе – использовано уравнение массопереноса. Для расчета поля скорости воздушного потока при наличии зданий на территории насосной станции, перекачивающей аммиак, использовано модель потенциального течения. Численное решение трехмерного уравнения для потенциала скорости проведено с помощью метода суммарной аппроксимации. При использовании этой численной модели учтено неравномерное поле скорости ветрового потока, изменение вертикального коэффициента атмосферной диффузии с высотой, интенсивность эмиссии аммиака, место выброса химически опасного вещества. Для численного решения уравнения переноса аммиака в атмосферном воздухе использована разностная схема расщепления. Предварительно осуществлено физическое расщепление трехмерного уравнения массопереноса на систему уравнений, описывающих перенос загрязняющего вещества в одном координатном направлении. На каждом шагу расщепления неизвестное значение концентрации аммиака определено по явной схеме бегущего счета. Рассмотрена математическая модель расчета разлета обломков на территории насосной станции. **Результаты.** На основе разработанной численной модели проведено вычислительный эксперимент для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха на территории насосной станции, которая перекачивает аммиак. Определена зона возможного поражения людей при разлетании осколков во время взрыва на территории станции. **Научная новизна.** Разработана численная модель, позволяющая рассчитывать зоны химического заражения при аварийной эмиссии аммиака на территории насосной станции. Модель дополнена оценкой зон поражения при разлетании осколков во время взрыва. **Практическая значимость.** На базе разработанной математической модели создана компьютерная программа, позволяющая проводить серийные расчеты для определения зон поражения при чрезвычайных ситуациях на территории химически опасных объектов. Разработанная математическая модель может быть использована при составлении плана ликвидации аварийной ситуации (ПЛАС) для химически опасных объектов.

Ключевые слова: химическое загрязнение атмосферы; аварийная эмиссия; математическое моделирование

L. V. AMELINA^{1*}, M. M. BILIAIEV^{2*}, O. V. BERLOV^{3*}, L. A. CHEREDNYCHENKO^{4*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-8525-7096

^{2*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57 e-mail berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{4*}Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57 e-mail cherednichenko@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-1457-9282

RISK ASSESSMENT WITH THE USE OF THE MONTE-CARLO METHOD

Purpose. This work involves the development of a numerical model for the calculation of chemical contamination zones in the event of ammonia accident at the pumping station, as well as a model for assessing the risk of damage and wound depth in the body in case of fragments scattering formed during the pipeline explosion at the pumping station. **Methodology.** To solve this problem, we used the mass transfer equation for the ammonia propagation in the air. A potential flow model is used to calculate the air flow velocity field in the presence of buildings at the ammonia pumping station. The numerical solution of the three-dimensional equation for the velocity potential is derived by the cumulative approximation method. When using this numerical model, the irregular field of wind flow velocity, the change in vertical atmospheric diffusion coefficient with altitude, the ammonia emission intensity, the

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

emission point of the chemical substance were taken into account. A differential splitting scheme was used to numerically solve the ammonia transfer equation in the air. Physical splitting of the three-dimensional mass transfer equation to a system of equations describing the contaminant transfer in one coordinate direction is carried out beforehand. At each step of splitting, the unknown value of ammonia concentration is determined by an explicit scheme of point-to-point computation. A mathematical model for calculating the fragments scattering in case of emergency at the pumping station is considered. **Findings.** On the basis of the developed numerical model, a computational experiment was conducted to estimate the level of air pollution at the ammonia pumping station. The area of possible damage of people during the fragment scattering during the explosion at the ammonia pumping station was determined. **Originality.** A numerical model has been developed that allows calculating the chemical contamination zones in case of emergency ammonia emission at the pumping station. The model is complemented by assessment of impact zones in case of fragment scattering during the pumping station explosion. **Practical value.** Based on the developed mathematical model, a computer program was created, which allows performing serial calculations for determining the impact zones during emergency situations at the chemically hazardous objects. The mathematical model developed can be used to perform serial calculations during the development of emergency response plan for chemically hazardous objects.

Keywords: atmosphere chemical pollution; emergency emission; mathematical modeling

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikh opasnykh veshchestv: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
4. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennogo riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian).
5. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, N. N. (1997). *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey sredy*. Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
6. Barret, A. M. (2009). *Mathematical Modeling and Decision Analysis for Terrorism Defense: Assessing Chlorine Truck Attack Consequence and Countermeasure Cost Effectiveness*. (Doctoral dissertation). Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania. (in English)
7. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. doi: 10.15802/stp2016/60953 (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
10. Tumanov, A., Gumenyuk, V., & Tumanov, V. (2017). Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 90, 1-11. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)
11. Naserzadeh, Z., Atabi, F., Moattar, F., & Nejad, N. M. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 10(1), 192-204. (in English)
12. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*, 9(11), 1-22. doi: 10.3390/su9112103 (in English)
13. Government of Alberta. (2017). Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Environmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. Zavila, O., Dobes, P., Dlabka, J., & Bitta, J. (2015). The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*, 2, 1-9. (in English)

Надійшла до редколегії: 13.08.2019

Прийнята до друку: 26.11.2019