

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5:621.565.8

Л. В. АМЕЛІНА<sup>1\*</sup>, О. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, М. Г. МАЛЮГІН<sup>3\*</sup>, З. М. ЯКУБОВСЬКА<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>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

<sup>2\*</sup>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

<sup>3\*</sup>Каф. «Безпека життєдіяльності», ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта ra9@bigmir.net, ORCID 0000-0001-9422-8265

<sup>4\*</sup>Каф. «Фізика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

### РОЗРАХУНОК ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ЗОН У РАЗІ АВАРІЙНОЇ ЕМІСІЇ АМІАКУ

**Мета.** Ця робота передбачає розробку математичної моделі для розрахунку вибухонебезпечних зон у разі аварійної емісії аміаку. Як приклад розглянуто аварійну емісію аміаку на території насосної станції, що здійснює перекачування. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використано рівняння для потоку нев'язкої нестисливої рідини – рівняння для потенціалу швидкості. Чисельне розв'язання цього тривимірного рівняння проведено за допомогою методу Річардсона. Після визначення потенціалу швидкості розраховано поле швидкості повітряного потоку. Для прогнозування вибухонебезпечних зон використано чисельне розв'язання тривимірного рівняння масопереносу аміаку. Під час використання цієї математичної 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. На кожному кроці розщеплення невідоме значення концентрації аміаку визначено за явною схемою біжучого рахунку. **Результати.** На основі розробленої математичної моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки динаміки формування вибухонебезпечних зон на території насосної станції, що перекачує аміак. Отримано інформацію про формування зон хімічного зараження на території насосної станції. **Наукова новизна.** Розроблено математичну модель, що дозволяє оперативно розраховувати динаміку формування вибухонебезпечних зон на території хімічно небезпечного об'єкта в разі виникнення надзвичайної ситуації. Ця модель може бути використана для оцінки ризику токсичного ураження людей на хімічно небезпечному об'єкті під час виникнення аварійних ситуацій. **Практична значимість.** На базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерну програму, що дозволяє проводити серійні обчислювальні експерименти з визначення динаміки формування зон хімічного зараження атмосферного повітря. Для використання розробленої програми необхідні стандартні вхідні дані. Розроблена чисельна модель може бути використана для проведення серійних розрахунків під час розробки ПЛАСу (план ліквідації аварійної ситуації) для хімічно небезпечних об'єктів.

*Ключові слова:* хімічне забруднення атмосфери; аміак; чисельне моделювання

#### Вступ

У наш час значну увагу привертають задачі оцінки забруднення навколишнього природного середовища та ризику ураження людей у ви-

падках надзвичайних ситуацій на хімічно небезпечних об'єктах або терактів [1, 2, 4, 6–9]. До таких об'єктів в Україні належить аміакопровід «Тольятті – Одеса». Цей об'єкт є потенціалом

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

льним джерелом небезпеки, бо у випадку аварійної ситуації в атмосферне повітря може потрапляти значна кількість токсичної речовини. До комплексу задач, які розглядають у разі можливих аварій на таких хімічно небезпечних об'єктах, належать задачі з визначення вибухонебезпечних зон. Ці зони формуються біля місця витoku хімічно небезпечної речовини, а розміри зон змінюються з часом. Для практики важливо мати надійну інформацію щодо формування вибухонебезпечних зон біля об'єкта з метою зниження ризику ураження людей. Слід підкресити, що особливо важливо мати таку інформацію для насосних станцій, що перекачують аміак. Це пов'язано з тим, що на території насосних станцій перебувають люди, і можливі ситуації, за яких буде мати вибух суміші «аміак+повітря».

Для розв'язання задач цього класу необхідно швидко розрахувати математичні моделі, що дозволяють у рамках обмеженого часу, проводити серійні розрахунки [10–14].

**Мета**

У цій роботі ми передбачаємо розробити чисельну модель для оперативного прогнозування вибухонебезпечних зон під час аварійної емісії аміаку.

**Методика**

Процес поширення аміаку у випадку його аварійного викиду будемо розраховувати на базі наступного рівняння масопереносу [2, 3, 5]:

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

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 ви-

киду аміаку;  $\sigma$  – 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 кінцево-різницеві методи. Попередньо здійснимо розщеплення рівняння (1) на послідовність розв'язання наступних рівнянь:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (3)$$

Для чисельного інтегрування перших трьох рівнянь використовують неявну попеременно-трикутну різницеву схему.

Розглянемо побудову цієї різницевої схеми. Виконаємо наступні перетворення [5]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}; \\ \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}; \\ \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

де

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

$$v^- = \frac{v-|v|}{2}; w^+ = \frac{w+|w|}{2}; w^- = \frac{w-|w|}{2}.$$

Далі виконаємо апроксимацію похідних так [5]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$-\mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} -$$

$$-\mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.$$

Для апроксимації конвективних похідних використовуємо вирази [3]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1};$$

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1};$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}.$$

Різницеву схему, за допомогою якої визначають концентрацію хімічно небезпечної речовини, розглянемо на прикладі тільки першого рівняння із системи (3). Різницєва схема має вигляд:

– на першому кроці розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k = M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n; \quad (4)$$

– на другому кроці розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} = M_{xx}^+ C^n + M_{xx}^- C^{n+1}. \quad (5)$$

Ті самі дії проводимо для другого та третього рівняння із системи рівнянь розщеплення.

Значення концентрації  $C$  на кожному кроці розщеплення знаходимо за формулою «розрахунку, що біжить». Останнє рівняння із системи (3) розв'язуємо за допомогою методу Ейлера.

Для математичного моделювання поля вітрового потоку на території промислового об'єкта, де має місце викид хімічно небезпечної речовини, була використана модель течії ідеальної рідини. Моделювальне рівняння в цьому випадку має вигляд [5]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0, \quad (6)$$

де  $P$  – потенціал швидкості.

Компоненти швидкості повітряного потоку визначають так:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x} \quad v = \frac{\partial P}{\partial y} \quad w = \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (7)$$

Граничні умови для рівняння (6) такі:

1)  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$  на непроникливих границях та на верхній поверхні розрахункової зони;

2)  $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$  на границі, де потік входить у розрахункову зону,  $V_n$  – відома швидкість повітря;

3)  $P = \text{const}$  – на границі «виходу» потоку із зони.

Для чисельного розв'язання рівняння (6) використовують метод Річардсона, тому це рівняння приводимо до вигляду:

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (8)$$

де  $t$  – фіктивний час.

Розрахункову залежність для визначення потенціалу швидкості запишемо так:

$$P_{ijk}^{n+1} = P_{ijk}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}. \quad (9)$$

Розрахунок за залежністю (9) закінчується, коли виконується умова:

$$\left| P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n \right| \leq \varepsilon, \quad (10)$$

де  $\varepsilon$  – мале число;  $n$  – номер ітерації.

Компоненти вектора швидкості визначають так:

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

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

На базі розглянутих різницевих рівнянь була створена комп'ютерна програма. Для кодування різницевих рівнянь використано Фортран.

### Результати

На базі розробленої чисельної моделі було проведено розрахунки з визначення вибухонебезпечних зон на території насосної станції, що перекачує аміак. Під час проведення обчислювального експерименту взято, що швидкість вітру дорівнює 3 м/с, інтенсивність викиду 100 кг/с,  $w_g = 1$  см/с,  $\sigma = 0$ .

Розрахункова схема промислового об'єкта (модельна задача, станція перекачування аміаку) та місце викиду аміаку на території об'єкта показано на рис. 1.

На рис. 2, 4 показано зону хімічного зараження атмосферного повітря на території насосної станції, де має місце виток аміаку. Значен-

ня концентрації аміаку наведено в безрозмірному вигляді, кожне число на цих рисунках представляє концентрацію аміаку у відсотках від максимального значення концентрації на конкретний момент часу в цій зоні.

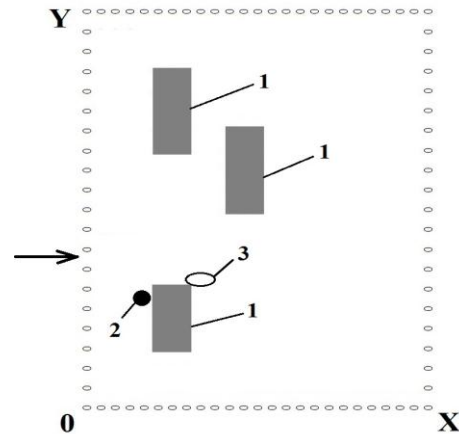


Рис. 1. Розрахункова схема:

1 – будівлі на території насосної станції;  
2 – місце викиду аміаку; 3 – положення рецептора

Fig. 1. Sketch of computational region:

1 – ammonia pump station buildings;  
2 – spot of ammonia emission; 3 – receptor position

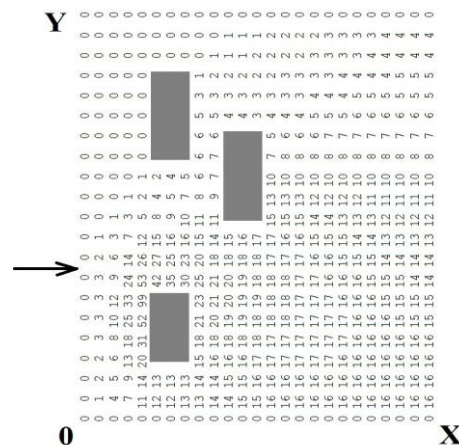


Рис. 2. Зона забруднення атмосферного повітря (рівень  $z = 2$  м,  $t = 35$  с)

Fig. 2. Computed zone of chemical contamination (level  $z = 2$  m,  $t = 35$  sec)

Як бачимо з рис. 2, 4, на території насосної станції дуже швидко формується велика зона хімічного зараження. Для практики важливо мати інформацію про розміри вибухонебезпечних зон, що з'являються у випадку аварійних ситуацій. У розробленій комп'ютерній програ-

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

мі наявна операція щодо друку вибухонебезпечних зон на території хімічно небезпечного об'єкта. У цьому випадку вибухонебезпечна зона – це зона де концентрація аміаку перебувала в діапазоні 106–198 г/м<sup>3</sup>. Комп'ютерна програма виділяє таку зону друком числа «99». Це дозволяє дуже швидко проаналізувати розміри вибухонебезпечних зон на території об'єкта під час проведення обчислювального експерименту й оцінювати зміну цих зон із часом. Так, на рис. 3, 5 наведені вибухонебезпечні зони для різних моментів часу після початку аварійного викиду аміаку. Зони показані за допомогою описаної процедури.

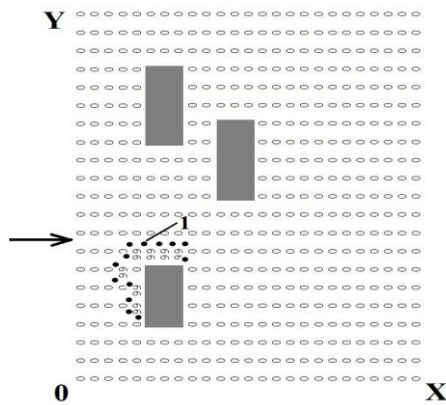


Рис. 3. Вибухонебезпечна зона:  
1 – межа зони (рівень  $z = 2\text{ м}$ ,  $t = 35\text{ с}$ )

Fig. 3. Computed zone of possible explosion:  
1 – zone boundary (level  $z = 2\text{ m}$ ,  $t = 35\text{ sec}$ )

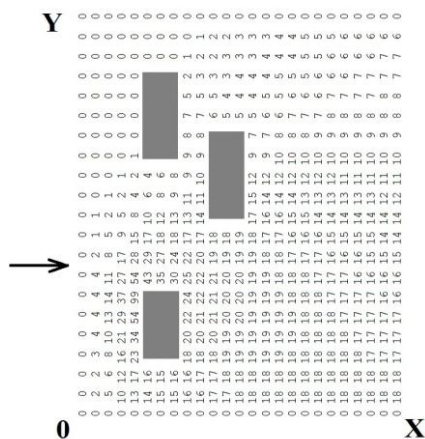


Рис. 4. Зона забруднення атмосферного повітря  
(рівень  $z = 2\text{ м}$ ,  $t = 55\text{ с}$ )

Fig. 4. Computed zone of chemical contamination  
(level  $z = 2\text{ m}$ ,  $t = 55\text{ sec}$ )

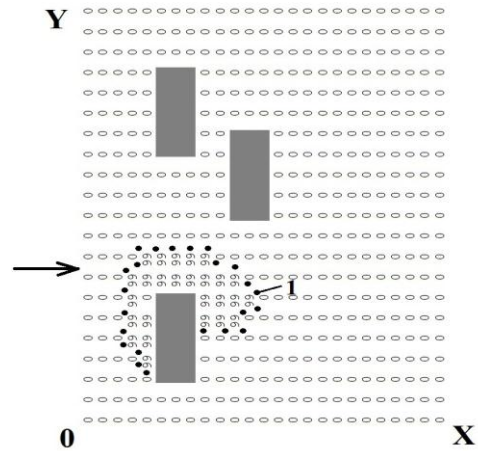


Рис. 5. Вибухонебезпечна зона:  
1 – межа зони (рівень  $z = 2\text{ м}$ ,  $t = 55\text{ с}$ )

Fig. 5. Computed zone of possible explosion:  
1 – zone boundary (level  $z = 2\text{ m}$ ,  $t = 55\text{ sec}$ )

З аналізу рис. 3, 5 можна зробити висновок, що у випадку аварійного викиду аміаку на території насосної станції дуже швидко формується вибухонебезпечна зона біля будівлі насосної станції, оскільки вибух може бути як на навітряній, так і на підвітряній стороні будівлі.

На рис. 6 наведена концентрація аміаку біля будинку насосної станції, де мав місце аварійний витік (рівень  $z = 2\text{ м}$ ). Значення концентрації приведено для точки, що показана на рис. 1 як місце положення рецептора.

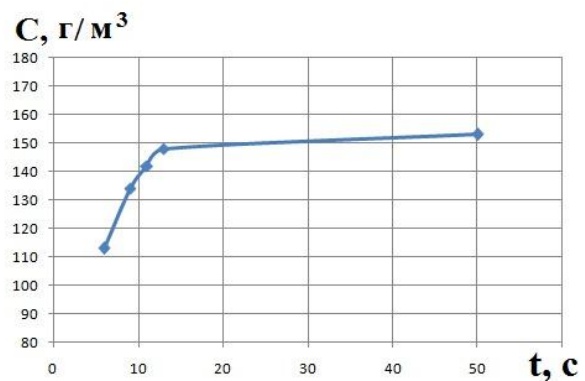


Рис. 6. Концентрація аміаку біля будівлі  
(рівень  $z = 2\text{ м}$ )

Fig. 6. Computed ammonia concentration  
near building (level  $z = 2\text{ m}$ )

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Як бачимо з рис. 6, біля будівлі вже за 7 с буде мати місце вибухонебезпечна концентрація суміші, в разі виникнення джерела тепла – вибух.

Слід зазначити, що для розв'язання задачі потрібно було 5 с комп'ютерного часу.

### Наукова новизна і практична значимість

Розроблена чисельна модель дозволяє оперативно прогнозувати динаміку формування зон хімічного зараження атмосферного повітря у випадку аварійного витіку аміаку на території насосної станції, де відбувається його перекачування. Особливістю моделі є можливість оперативного представлення інформації щодо розмірів вибухонебезпечних зон на території об'єкта і їх зміна з часом, після аварії.

Модель дозволяє швидко проводити прогнозні розрахунки на комп'ютерах малої та середньої потужності. Вона враховує найбільш суттєві фізичні фактори, що впливають на фор-

мування зон хімічного зараження, а саме: швидкість повітря, потужність джерела емісії, атмосферну турбулентну дифузію, наявність будівель на території хімічно небезпечного об'єкта.

Модель може бути використана під час розробки ПЛАСу для хімічно небезпечних об'єктів. У подальшому потрібно розробляти математичну модель аеродинаміки, що враховує в'язкість повітря.

### Висновки

1. Запропоновано математичну модель для оцінки розмірів вибухонебезпечних зон у разі аварійних викидів аміаку.

2. Розроблено комп'ютерну програму для проведення експрес-розрахунків із визначення динаміки формування зон хімічного зараження під час аварійних викидів аміаку.

3. Виконано прогноз розмірів вибухонебезпечних зон у випадку аварійного викиду аміаку на 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. Гулько, 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. Гулько, 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: <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemicaltransport-operations?product=139> – Назва з екрана. – Переверено : 15.10.2019
10. Development of advanced mathematical predictive models for assessing damage avoided accidents on potentially-dangerous sea-based energy facility / Aleksandr Tumanov, Vasily Gumenyuk, Vladimir Tumanov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – Vol. 90. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027

## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

11. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling / Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, Naser 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 / Cejun Cao, Congdong Li, Qin Yang, Fanshun Zhang // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – Iss. 11. 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 доступа: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> – Назва з екрана. – Перевірено : 15.10.2019
14. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes / Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlabka, Jan Bitta // The Science for Population Protection. – 2015. – No. 2.

Л. В. АМЕЛИНА<sup>1\*</sup>, А. В. БЕРЛОВ<sup>2\*</sup>, М. Г. МАЛЮГИН<sup>3\*</sup>, З. М. ЯКУБОВСКАЯ<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>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](mailto:water.supply.treatment@gmail.com), ORCID 0000-0002-8525-7096

<sup>2\*</sup>Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта [berlov@pgasa.dp.ua](mailto:berlov@pgasa.dp.ua), ORCID 0000-0002-7442-0548

<sup>3\*</sup>Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта [pa9@bigmir.net](mailto:pa9@bigmir.net), ORCID 0000-0001-9422-8265

<sup>4\*</sup>Каф. «Физика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта [physics@udhtu.edu.ua](mailto:physics@udhtu.edu.ua), ORCID 0000-0002-9893-3479

## РАСЧЕТ ВЗРЫВООПАСНЫХ ЗОН ПРИ АВАРИЙНОЙ ЭМИССИИ АММИАКА

**Цель.** Данная работа предусматривает разработку математической модели для расчета взрывоопасных зон при аварийной эмиссии аммиака. В качестве примера рассмотрена аварийная эмиссия аммиака на территории перекачивающей насосной станции. **Методика.** Для решения поставленной задачи использовано уравнение для потока невязкой несжимаемой жидкости – уравнение для потенциала скорости. Численное решение данного трехмерного уравнения проведено с помощью метода Ричардсона. После определения потенциала скорости рассчитано поле скорости воздушного потока. Для прогнозирования взрывоопасных зон использовано численное решение трехмерного уравнения массопереноса аммиака. При использовании этой математической модели учтены 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. На каждом шаге расщепления неизвестное значение концентрации аммиака определено по явной схеме бегущего счета. **Результаты.** На основе разработанной математической модели проведен вычислительный эксперимент по оценке динамики формирования взрывоопасных зон на территории насосной станции, перекачивающей аммиак. Получена информация о формировании зон химического заражения на территории насосной станции. **Научная новизна.** Разработана математическая модель, позволяющая оперативно рассчитывать динамику формирования взрывоопасных зон на территории химически опасного объекта при возникновении чрезвычайной ситуации. Эта модель может быть использована для оценки риска токсического поражения людей на химически опасном объекте при возникновении аварийных ситуаций. **Практическая значимость.** На базе разработанной численной модели создана компьютерная программа, позволяющая проводить серийные вычислительные эксперименты по определению динамики формирования зон химического заражения атмосферного воздуха. Для использования разработанной программы необходимы стандартные входные данные. Разработанная численная модель может быть использована для проведения серийных расчетов при разработке ПЛАСа (план ликвидации аварийной ситуации) для химически опасных объектов.

*Ключевые слова:* химическое загрязнение атмосферы; аммиак; численное моделирование

L. V. AMELINA<sup>1\*</sup>, O. V. BERLOV<sup>2\*</sup>, M. H. MALIUHIN<sup>3\*</sup>, Z. M. YAKUBOVSKA<sup>4\*</sup>

<sup>1\*</sup>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

<sup>2\*</sup>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

<sup>3\*</sup>Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57 e-mail pa9@bigmir.net, ORCID 0000-0001-9422-8265

<sup>4\*</sup>Dep. «Physics», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

## CALCULATION OF EXPLOSIVE ZONES IN EMERGENCY EMISSION OF AMMONIA

**Purpose.** This work involves the development of a mathematical model for the calculation of hazardous areas during emergency ammonia emissions. As an example emergency ammonia emissions at the pumping station are considered. **Methodology.** To solve this problem, we used the equation for the flow of ideal liquid – the equation for the velocity potential. The numerical solution of this three-dimensional equation is carried out using the Richardson method. After determining the velocity potential, the air velocity field is calculated. To predict explosive zones, a numerical solution of the three-dimensional equation of the ammonia mass transfer is used. When using this mathematical model, the non-uniform field of the wind flow velocity, the change in the vertical coefficient of atmospheric diffusion with height, the intensity of ammonia emission, and the place of release of the chemically hazardous substance are taken into account. To numerically solve the equation of ammonia transport in atmospheric air, a difference splitting scheme is used. At each step of the splitting, the unknown value of ammonia concentration is determined by the explicit formula of the point-to-point computation. **Findings.** Based on the developed mathematical model, a computational experiment was conducted to assess the dynamics of the formation of explosive zones in the territory of a pumping station that pumps ammonia. Information was obtained on the formation of chemical contamination zones at the pumping station. **Originality.** A mathematical model has been developed that allows you to quickly calculate the dynamics of the formation of explosive zones in the territory of a chemically hazardous object in case of emergency. The developed mathematical model can be used to assess the risk of toxic damage to people at a chemically hazardous facility in case of emergency. **Practical value.** On the basis of the developed numerical model a computer program was created, which allows to carry out serial computational experiments to determine the formation dynamics of the chemical contamination zones of atmospheric air. Standard input data are required to use the developed program. The developed numerical model can be used for serial calculations in the development of the emergency response plan for chemically hazardous facilities.

**Keywords:** chemical pollution of the atmosphere; ammonia; numerical simulation

### REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: Uchebnoye posobie dlya vuzov*. Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. 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., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. 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*. (Dissertation of Doctor of Philosophy). Carnegie Mellon University, Pittsburg. (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)



## ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

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*. Retrived from <https://app.croneri.co.uk/news/cefic-guidance-safety-risk-assessment-chemical-transportoperations?product=139> (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. doi: 10.1088/1755-1315/90/1/012027 (in English)
11. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar, & Naser Moharram Nejad. (2017). Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication*, 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). 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. Retrived 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. (in English)

Надійшла до редколегії: 16.05.2019

Прийнята до друку: 20.09.2019