

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

УДК 504.5:[621.643:661.53]

Л. В. АМЕЛІНА¹, М. М. БІЛЯЄВ², О. В. БЕРЛОВ^{3*}, О. О. ВЕРГУН⁴, Т. І. РУСАКОВА⁵

¹Каф. «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

²Каф. «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», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁴Каф. «Екологія та охорона навколишнього середовища», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 33 71, ел. пошта vergun.oksana@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-4842-1069

⁵Каф. «Безпека життєдіяльності», Дніпровський національний університет імені О. Гончара, пр. Гагаріна, 18, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (066) 394 52 14, ел. пошта gusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

Моделювання забруднення довкілля в разі емісії аміаку з пошкодженого трубопроводу

Мета. Ця робота передбачає розробку гідравлічної моделі для розрахунку нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу та імплементацію цієї моделі в чисельну модель прогнозу аварійного забруднення атмосфери. **Методика.** Для розв'язання поставленої задачі використано розрахункові залежності гідравліки напірних потоків. Для розрахунку процесу випарювання аміаку з пошкодженого трубопроводу також використано емпіричну модель. Для розрахунку процесу розповсюдження аміаку в атмосферному повітрі використано тривимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Під час математичного моделювання розповсюдження аміаку з пошкодженого трубопроводу враховано зміну з висотою швидкості вітрового потоку, а також зміну з висотою вертикального коефіцієнта атмосферної дифузії, динаміку зміни з часом інтенсивності витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. Для чисельного розв'язання тривимірного диференціального рівняння переносу аміаку в атмосферному повітрі здійснено його фізичне розщеплення: виділено рівняння, що описує перенос домішки за рахунок конвекції, рівняння, що описує перенос домішки за рахунок атмосферної дифузії, та рівняння, що описує зміну концентрації аміаку в повітрі внаслідок дії джерела емісії. Для чисельного інтегрування рівняння конвективного переносу аміаку в повітрі використано метод Мак-Кормака, рівняння дифузійного переносу домішки – метод Річардсона, рівняння, що описує зміну концентрації аміаку під дією джерела емісії, – метод Ейлера. **Результати.** На основі розробленої моделі нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу та чисельної моделі розповсюдження аміаку в атмосферному повітрі проведено обчислювальний експеримент для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря та підстильної поверхні у випадку аварійного витоку аміаку на ділянці, де аміакопровід «Тольятті – Одеса» перетинає річку Дніпро. Отримано дані щодо нестационарного забруднення довкілля. **Наукова новизна.** Розроблено математичну модель, що дозволяє розраховувати нестационарний процес витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. Запропоновано чисельну модель для визначення областей забруднення в разі аварійного витоку аміаку з аміакопроводу «Тольятті – Одеса». **Практична значимість.** На базі розробленої моделі створено код, що дозволяє оперативно прогнозувати динаміку забруднення навколишнього середовища за аварійного витоку аміаку. Запропонована математична модель може бути використана під час розробки плану ліквідації аварійної ситуації (ПЛАС) для хімічно небезпечних об'єктів.

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

Вступ

Аварійний викид хімічно небезпечних речовин [1–5, 7–14], наприклад, із пошкоджених трубопроводів (рис. 1) створює загрозу інтенсивного забруднення навколишнього середовища та ризику ураження людей. Тому виникає проблема прогнозування наслідків такого витоку. Для прогнозування масштабу аварійного забруднення довкілля в разі аварійної емісії хімічно небезпечних речовин [1, 3, 4, 7–9] використовують різного класу моделі: аналітичні, чисельні, модель Гауса, нормативну методику, що розроблена для ДСНС (Державна служба України з надзвичайних ситуацій). Ці моделі зручні для практичного використання та дають можливість швидко визначити рівень хімічного забруднення навколишнього середовища. Під час застосування будь-якої прогнозувальної моделі вкрай важливо коректно визначити інтенсивність джерела емісії хімічно небезпечної речовини, що потрапляє в повітря з пошкодженого обладнання. Аналіз літературних джерел, присвячених прогнозуванню забруднення навколишнього середовища за аварійних емісій аміаку, показав, що прогнозування виконують із використанням постійного значення інтенсивності викиду аміаку Q , тобто процес викиду є стаціонарним із точки зору емісії небезпечної речовини. Такий підхід є досить спрощеним, оскільки не відображає фізику процесу викиду аміаку з трубопроводу, що перебуває під надлишковим тиском. У разі появи отвору в трубопроводі з часом має місце зниження надлишкового тиску ΔP_s . Унаслідок цього змінюється значення Q – інтенсивності викиду хімічно небезпечної речовини, оскільки $Q = f(\Delta P_s, t)$. Тобто процес емісії аміаку з трубопроводу є суттєво нестационарним.

Це значить, що залежно від часу має місце різне «навантаження» від викиду аміаку на забруднення навколишнього середовища. Тому для адекватної оцінки рівня забруднення навколишнього середовища за аварійного викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу потрібно враховувати зміну тиску з часом в аміакопроводі. У цій роботі запропоновано модель, за допомогою якої це можна зробити. Побудову цієї моделі розглянуто в гідравлічному наближенні. Особливістю запропонованої моделі

є те, що вона враховує нестационарний процес витоку аміаку з трубопроводу, тобто зміну з часом витрати аміаку, що потрапляє в природне навколишнє середовище.



Рис. 1. Аварійний витік аміаку
[<https://www.mda.state.mn.us/ammonia-incident-summaries>]

Fig. 1. Emergency outflow of ammonia
[<https://www.mda.state.mn.us/ammonia-incident-summaries>]

Мета

Основною метою роботи є розробка методу розрахунку нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу та прогнозування рівня забруднення довкілля в разі пошкодження аміакопроводу «Тольятті – Одеса».

Методика

Розглянемо побудову методу розрахунку нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. Відзначимо, що аміак у трубі являє собою перегріту рідину. Середній надлишковий тиск в аміакопроводі «Тольятті – Одеса» близько $\Delta P_s^n = 35 \text{ ат}$. У разі появи отвору в стінці трубопроводу під тиском почнеться інтенсивний витік аміаку. Процес викиду аміаку з труби будемо поділяти на два етапи:

1. Перший етап – напірний викид аміаку з трубопроводу внаслідок надлишкового тиску ΔP_s в ньому.

2. Другий етап – викид аміаку за рахунок його випарювання (після скидання надлишкового тиску).

Масу аміаку, який витікає з пошкодженого трубопроводу, подано так:

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

$$M = M_1 + M_2,$$

де M_1 – маса аміаку, що потрапить в атмосферу в разі напірного викиду з пошкодженого трубопроводу; M_2 – маса аміаку, що випаровується після напірного викиду аміаку.

Алгоритм розрахунку інтенсивності викиду аміаку (маси аміаку M_1 та інших параметрів) на першому етапі будемо виконувати в такій послідовності:

1. Визначаємо об'єм аміаку W в секції (довжина секції $L = 5$ км) за відсутності надлишкового тиску ΔP_s :

$$W = S \cdot L,$$

де $S = 0,785d^2$ – площа поперечного перерізу трубопроводу, $d = 0,355$ м – діаметр трубопроводу.

2. Розраховуємо масу аміаку M у трубі за умови, коли не було б надлишкового тиску та зріджений аміак заповнював би трубопровід як нестислива рідина:

$$M = W \cdot \rho,$$

де ρ – щільність (0,68 кг/м³).

3. Визначаємо «надлишковий» об'єм аміаку ΔW в секції за наявності надлишкового тиску ΔP_s :

$$\Delta W = \beta W \Delta P_s^n,$$

де β – коефіцієнт об'ємного тиску.

4. Визначаємо «надлишкову» масу аміаку ΔM в секції за надлишкового тиску ΔP_s :

$$\Delta M = \rho \Delta W.$$

5. Визначаємо об'єм аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час Δt :

$$Q = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \frac{\Delta P_s^n}{\gamma} \Delta t}, \quad (1)$$

де ω – площа отвору, з якого витікає аміак; μ – коефіцієнт витрати; γ – питома вага.

Відзначимо, що значення n відповідає значенню фізичного параметра на попередньому часовому кроці.

6. Визначаємо масу аміаку, що виходить з отвору в трубопроводі за час Δt :

$$\Delta m = \rho Q.$$

7. Визначаємо «надлишковий» об'єм та масу аміаку, що залишилася в трубі після часу Δt :

$$\Delta W^{n+1} = \Delta W - Q,$$

$$\Delta M^{n+1} = \rho \Delta M - \Delta m,$$

де позначка $n+1$ – відповідає значенню параметра на новому часовому кроці.

8. Визначаємо зміну надлишкового тиску в трубі внаслідок витоку аміаку за час Δt :

$$\Delta P_s^{n+1} = \Delta P_s^n - \Delta P,$$

де $\Delta P = \frac{\Delta W^{n+1}}{W \cdot \beta}$.

9. Далі процедуру розрахунку повторюємо, починаючи з п. 5, та визначаємо нові значення ΔW , Q , ΔM , ΔP на новому часовому кроці.

Розрахунок за цими залежностями закінчується, коли надлишковий тиск у пошкодженому трубопроводі буде дорівнювати нулю. На цей момент часу маса аміаку, викинута з пошкодженого трубопроводу, буде дорівнювати M_1 . У трубопроводі залишиться маса аміаку M_2 .

Слід підкреслити, що для розрахунку витрати аміаку на базі залежності (1) використано експериментальні значення коефіцієнта витрати отвору, отримані раніше [12].

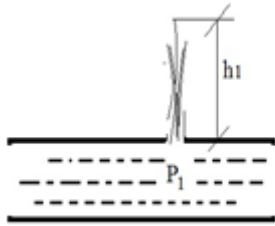
У запропонованій методиці потрібно підкреслити ще одну перевагу – вона дає можливість розрахувати зміну з часом висоти h струменя аміаку, що викидається з трубопроводу. Для цього використовують відому гідравлічна залежність:

$$h(t) = \frac{\Delta P(t)}{\gamma}. \quad (2)$$

Величина $h(t)$ змінюється з часом – вона зменшується (рис. 2), оскільки з часом зменшується величина надлишкового тиску $\Delta P_s(t)$ в аміакопроводі.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

а – а



б – б

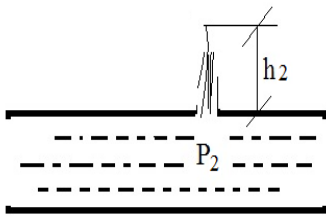


Рис. 2. Схема зміни висоти викиду струменя аміаку в разі зміни тиску в трубопроводі:
а – великий тиск; б – малий тиск

Fig. 2. Scheme of the change in the height of the emission of an ammonia jet when the pressure in the pipeline changes:
а – high pressure; б – low pressure

Розрахунок параметра $h(t)$ є досить важливим, тому що його значення дає можливість у моделі відтворювати реальну фізику процесу викиду аміаку.

Також слід відзначити, що згідно з рівнянням Бернуллі в разі зміни геометричної висоти аміакопроводу z має місце зміна тиску P в трубопроводі (рис. 3). Тобто у двох сусідніх перерізах трубопроводу, що мають різні значення z_1 , z_2 , значення тиску P (висоти h_1 , h_2) буде різне.

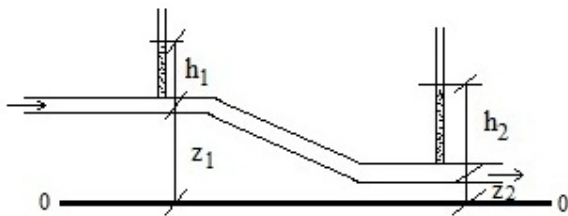


Рис. 3. Схема зміни тиску в трубопроводі в разі зміни геометричної висоти z

Fig. 3. Scheme of the change in pressure in the pipeline when changing the geometric height z

Для врахування цього потрібно до розробленої моделі внести дані щодо зміни геометричної висоти аміакопроводу на певній ділянці.

На другому етапі розрахунку інтенсивність потрапляння аміаку за одиницю часу за рахунок випарювання будемо визначати на базі емпіричної моделі [6]:

$$Q = (5,83 + 4,1 \cdot V) P \sqrt{G},$$

де V – швидкість повітря, G – молекулярна маса, P – тиск насичених парів.

Масу аміаку, що випарилася з трубопроводу за час dt , розраховуємо так:

$$M = Q \cdot S \cdot dt,$$

де S – площа отвору.

Процес розрахунку закінчується, коли $M = M_2$, тобто до моменту часу повного випарювання аміаку (тієї частини рідини, що залишилася після напірного викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу).

Для проведення розрахунків на базі запропонованої моделі гідравлічного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу як початкові дані слід задати:

- 1) площу отвору в аміакопроводі;
- 2) довжину секції труби;
- 3) надлишковий тиск в аміакопроводі на момент аварії;
- 4) розрахунковий крок за часом;
- 5) коефіцієнт витрати.

Програмна реалізація розглянутої моделі виконана алгоритмічною мовою FORTRAN. Розроблено програму PruD.exe. Результатом роботи програми PruD.exe є динаміка зниження надлишкового тиску в трубопроводі, зміна висоти струменю аміаку з часом, динаміка зміни з часом маси аміаку, що виходить з трубопроводу.

У наведених нижче таблицях показано розрахункові дані щодо зміни надлишкового тиску в аміакопроводі та маси аміаку, що викидається з нього у випадку появи отвору. Розрахунок виконано для площі отвору $S = 0,096 \text{ м}^2$, коефіцієнт витрати взято $0,18$ [1].

Таблиця 1

Сумарна кількість аміаку, викинута з трубопроводу за часом

Table 1

The total amount of ammonia emitted from the pipeline over time

Час	Маса
10 с	11 711 кг
50 с	54 461 кг
70 с	73 470 кг
257 с	171 146 кг
275 с	172 911 кг

Таблиця 2

Зміна надлишкового тиску в аміакопроводі

Table 2

Change in excess pressure in the ammonia pipe

Час	Надлишковий тиск
10 с	32,59 ат.
50 с	23,97 ат.
70 с	20,14 ат.
257 с	0,45 ат.
275 с	0,10 ат.

Як бачимо з наведених таблиць, із часом значення надлишкового тиску в аміакопроводі швидко змінюється, що впливає на кількість емітованого в повітря аміаку. Розрахунки показали, що перший етап викиду аміаку з пошкодженого трубопроводу (викид за рахунок надлишкового тиску) закінчується приблизно за 280 с, та починається другий етап – випарювання аміаку з пошкодженого трубопроводу. Із наведених результатів видно, що на першому етапі має місце дуже швидке потрапляння значної маси аміаку в навколишнє середовище. Це потрібно враховувати під час оцінки забруднення природного навколишнього середовища у випадку пошкодження аміакопроводу.

Результати

Прогнозування забруднення довкілля. Далі, використовуючи гідравлічну модель нестационарного витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу, наведену вище, ми виконали прогноз забруднення довкілля в разі аварійної емісії аміаку на аміакопроводі «Тольятті – Одеса». Для моделювання процесу поширення аміаку в повітрі використано рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки [2, 3, 5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} + \sigma C = \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_0(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (3)$$

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; t – час.

Крайові умови для рівняння (1) розглянуто в [2].

Під час використання моделювального рівняння (1) враховано нерівномірність швидкості повітря за висотою та вертикального коефіцієнта дифузії:

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

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

У розробленій чисельній моделі виходу струменя зрідженого аміаку величину $h(t)$ задаємо набором точкових джерел емісії у вигляді дельта-функцій Дірака. Сума точкових джерел дорівнює масі аміаку, що викинута з трубопроводу на розрахунковий час t .

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Для чисельного інтегрування цього рівняння здійснимо таке розщеплення:

$$\begin{aligned}\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} &= 0;\end{aligned}\quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right); \quad (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (7)$$

Це розщеплення має фізичний сенс: перші три рівняння (1)–(3) моделюють поширення аміаку за рахунок руху повітря. Рівняння (4) описує поширення аміаку в повітрі за рахунок турбулентної дифузії в атмосфері. Рівняння (5) описує зміну концентрації аміаку за рахунок вимивання опадами або за рахунок хімічних перетворень. Зміна концентрації аміаку внаслідок дії джерела емісії моделюється рівнянням (6). Для чисельного інтегрування перших трьох рівнянь використовують метод Мак-Кормака. Для чисельного розв'язання рівняння (4) використовують метод Річардсона, а рівнянь (5), (6) – метод Ейлера.

Результати чисельного моделювання. Нижче на рисунках показано результати розв'язання задачі з визначення зон забруднення в разі аварійної емісії аміаку з трубопроводу. Прогнозування виконано за таких додаткових даних: розміри розрахункової області 3 000x2 100x1 000 м; швидкість вітру на рівні $z = 10$ м дорівнює 7 м/с; значення коефіцієнтів дифузії розраховують на базі залежностей, наведених вище під час розгляду прогнозу моделі; напрям вітру південно-західний. Цей вітер дме в бік с. Вовниги, розташованого на правому березі р. Дніпро.



Рис. 4. Схема розрахункової області (аміакопровід «Тольятті – Одеса», що перетинає р. Дніпро), Google image 2020

Fig. 4. Computational domain (place where «Tolyatti – Odesa» ammonia pipe line crosses River Dnipro), Google image 2020

На наступних рисунках наведено зони забруднення атмосферного повітря (рівень $z = 6$ м).



Рис. 5. Зона забруднення, $t = 50$ С:
1 – $C = 2,5$ г/м³; 2 – $C = 5,9$ г/м³

Fig. 5. Contamination zone, $t = 50$ С:
1 – $C = 2.5$ g/m³; 2 – $C = 5.9$ g/m³



Рис. 6. Зона забруднення, $t = 80$ С:
1 – $C = 4,1$ г/м³; 2 – $C = 9,4$ г/м³

Fig. 6. Contamination zone, $t = 80$ С:
1 – $C = 4.1$ g/m³; 2 – $C = 9.4$ g/m³

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА



Рис. 7. Зона забруднення, $t = 320$ С:
1 – $C = 4,9$ г/м³; 2 – $C = 11,6$ г/м³

Fig. 7. Contamination zone, $t = 320$ С:
1 – $C = 4.9$ g/m³; 2 – $C = 11.6$ g/m³

На наступному етапі прогнозування здійснено розрахунок кількості аміаку G , що осів на різні ділянки, які потрапили під вплив джерела емісії. Розрахунок цієї величини базувався на розрахунку концентрації C аміаку на рівні підстильної поверхні, у чисельній моделі це була величина $z = 0,2$ м.

У табл. 3 показана кількість домішки, що осів на поверхню поля, розташованого біля с. Вовниги.

Таблиця 3

Кількість аміаку, що потрапила на поверхню полів

Table 3

The amount of ammonia that hit the surface of the fields

Час	Кількість аміаку
3 хв	$0,79 \times 10^3$ кг
5 хв	$0,23 \times 10^4$ кг
10 хв	$0,31 \times 10^5$ кг
20 хв	$0,11 \times 10^6$ кг
25 хв	$0,15 \times 10^6$ кг

Із даних таблиць бачимо, що з часом збільшується ступінь забруднення підстильної поверхні. Також потрібно відзначити, що до моменту часу приблизно $t = 4,6$ хв припиняється напірний викид аміаку з пошкодженого трубопроводу, тобто припиняється активна фаза забруднення навколишнього середовища, а далі

починається потрапляння аміаку в повітря за рахунок випарювання крізь отвір у пошкодженому трубопроводі.

Відзначимо, що час розрахунку складає 4 с.

Наукова новизна та практична значимість

Розроблено математичну модель, що дозволяє розраховувати інтенсивність нестационарної емісії зрідженого аміаку з пошкодженого трубопроводу. Модель базується на використанні розрахункових залежностей гідравліки. Вона дозволяє проводити розрахунок динаміки витoku аміаку з урахуванням зміни надлишкового тиску в пошкодженому аміакопроводі. Також розроблено чисельну модель для оцінювання рівня забруднення довкілля в разі аварійної емісії аміаку з пошкодженого трубопроводу.

Побудовану гідравлічну модель аварійного витoku аміаку з пошкодженого трубопроводу імплементовано в розроблений код, що дозволяє визначити динаміку забруднення довкілля за аварійного витoku аміаку. Це дає можливість отримати науково обгрунтовану інформацію про динаміку забруднення довкілля в разі аварійного викиді аміаку.

Модель може бути використана під час проведення серійних розрахунків із визначення масштабу забруднення довкілля в разі аварій на аміако- або інших трубопроводах, що транспортують хімічно небезпечні речовини.

Висновки

1. Запропоновано математичну модель динаміки аварійного витoku аміаку з пошкодженого аміакопроводу.

2. Модель дозволяє оперативно визначити зміну з часом витрати аміаку, що потрапляє в повітря в разі розгерметизації аміакопроводу.

3. Використання побудованої моделі на практиці дозволяє науково обгрунтовано визначити інтенсивність емісії джерела забруднення, що необхідно знати під час застосування прогнозних моделей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Амелина Л. В., Беляев Н. Н., Пашенко А. В. Аварийная утечка из аммиакопровода «Тольятти-Одесса»: расчет зоны загрязнения реки Днепр на базе численной модели. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2011. № 62. С. 19–24.
2. Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю., Кириченко П. С., Мунтян Л. Я. *Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте*. Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. 127 с.
3. Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю., Росточило Н. В. *Защита зданий от проникновения в них опасных веществ* : монография. Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. 136 с.
4. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наук. думка, 1997. 368 с.
5. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва : Наука, 1982. 320 с.
6. Мацак В. Г., Хоцянов Л. Г. *Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве*. Москва : Медгиз, 1959. 231 с.
7. 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. Carnegie Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania, 2009. 123 p.
8. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). P. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
9. 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*. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
10. Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103>
11. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. URL: <http://clc.am/OnkmUw> (дата звернення: 05.01.2021).
12. Naserzadeh Z., Atabi F., Moattar F., Nejad N. M. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modeling. *Bioscience Biotechnology Research Communication*. 2017. Vol. 10. Iss. 1. P. 192–204.
13. Protective Action Criteria : A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. *Government of Alberta*. 2017. URL: <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (дата звернення: 05.01.2021).
14. Tumanov A., Gumenyuk V., Tumanov V. 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*. 2017. Vol. 90. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027>
15. Zavila O., Dobes P., Dlabka J., Bitta J. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The Science for Population Protection*. 2015. № 2. P. 1–9.

L. V. AMELINA¹, M. M. BILIAIEV², O. V. BERLOV^{3*}, O. O. VERHUN⁴, T. I. RUSAKOVA⁵

¹Dep. «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

²Dep. «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, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 34 57, e-mail berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

⁴Dep. «Ecology and Environmental Protection», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756 33 71, e-mail vergun.oksana@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-4842-1069

⁵Dep. «Life Safety», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (066) 394 52 14, e-mail rusakovati1977@gmail.com, ORCID 0000-0001-5526-3578

Modeling of Environmental Pollution by Ammonia Emission from a Damaged Pipeline

Purpose. This work provides for the development of a hydraulic model for calculating the unsteady ammonia outflow from a damaged pipeline and the implementation of this model into a numerical model for predicting emergency air pollution. **Methodology.** To solve the problem, the calculated dependencies of the pressure flow hydraulics were used. An empirical model to calculate the evaporation of ammonia from a damaged pipeline was also used. To calculate the process of spreading ammonia in atmospheric air, a three-dimensional equation of convective-diffusion transfer of impurities was used. Mathematical modeling of the spread of ammonia from a damaged pipeline takes into account the change with height of the wind flow velocity, as well as the change with height of the vertical coefficient of atmospheric diffusion, the dynamics of changes over time in the intensity of ammonia leakage from the damaged pipeline. For the numerical solution of the three-dimensional differential equation for the transfer of ammonia in atmospheric air, its physical splitting is carried out: an equation that describes the transport of an impurity due to convection is singled out separately, an equation that describes the transport of an impurity due to atmospheric diffusion and separately an equation that describes a change in the ammonia concentration in air due to the action of the emission source. The McCormack method is used to numerically integrate the equation for the convective transfer of ammonia in air. The Richardson method is used to numerically integrate the equation of diffusion transfer of an impurity. The Euler method is used to numerically integrate the equation that describes the change in ammonia concentration under the influence of an emission source. **Findings.** Based on the developed model of unsteady ammonia outflow from the damaged pipeline and the created numerical model of ammonia propagation in the atmospheric air, a computational experiment was carried out to assess the level of atmospheric air and underlying surface pollution in the event of an emergency ammonia outflow in the section where the Tolyatti – Odessa ammonia pipeline crosses the Dnipro River. Data on non-stationary environmental pollution were obtained. **Originality.** A mathematical model that allows calculating the unsteady process of ammonia outflow from a damaged pipeline has been developed. A numerical model is proposed to determine the areas of contamination during an emergency ammonia outflow from the Tolyatti – Odessa ammonia pipeline. **Practical value.** Based on the developed model, a code has been created that makes it possible to promptly predict the environmental pollution dynamics during an emergency ammonia outflow. The proposed mathematical model can be used in the development of emergency response plan for chemically hazardous facilities.

Keywords: ammonia pipeline; chemical atmosphere pollution; emergency emission; mathematical modeling

REFERENCES

1. Amelina, L. V., Biliaiev, N. N., & Pashhenko, A. V. (2011). Avariynaya utechka iz ammiakoprovoda «Tolyatti-Odessa»: raschet zony zagryazneniya reki Dnepr na baze chislennoy modeli. *Construction, materials science, mechanical engineering*, 62, 19-24. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogenogo riska priemissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte*. Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
3. Biliaiev, N. N., Gunko, E. Y., & Rostochilo, N. V. (2014). *Zashchita zdaniy ot proniknoveniya v nikhopasnykh veshchestv: monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (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. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Matsak, V. G., & Khotsyanov, L. G. (1959). *Gigienicheskoe znachenie skorosti isparennya i davleniya para toksicheskikh veshchestv, primenyaemykh v proizvodstve*. Moscow: Medgiz. (in Russian)
7. 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)
8. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
9. 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: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

10. 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: <https://doi.org/10.3390/su9112103> (in English)
11. CEFIC Guidance on safety Risk Assessment for Chemical Transport Operations. *Croner-i*. Retrieved from <http://clc.am/OnkmUw> (in English)
12. 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)
13. Protective Action Criteria: A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. (2017). *Government of Alberta*. Retrieved from <http://open.alberta.ca/publications/9781460131213> (in English)
14. 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* (Vol. 90, pp. 1-11).
DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/90/1/012027> (in English)
15. 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: 12.10.20

Прийнята до друку: 10.02.21