

УДК 614.8.06

А. А. Лесько¹, ад'юнкт (ORCID 0009-0003-2053-2362)

О. В. Кулаков¹, к.т.н., доцент, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)

С. О. Домолега², н.с. відділу (ORCID 0009-0000-9796-9181)

¹Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

²Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, м. Київ, Україна

МОДЕЛЬ ПРИМУСОВОГО ОСАДЖЕННЯ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

Побудована модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких небезпечних газів (небезпечних хімічних речовин із густиною більшою за атмосферне повітря). Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливістю отриманої моделі є врахування під час розповсюдження важкого газу процесу його примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини різної інтенсивності. При цьому осадження відбувається за рахунок процесів сорбції газів краплинами рідини. Встановлено, що розповсюдження важких газів в атмосфері виявляє ознаки потоку рідини та отримана модель є перехідним варіантом між системами моделей дифузії газів та гідродинамічними моделями потоку рідин. Врахування припущення про нестискаємість газу за рахунок значної різниці швидкостей звуку між важким газом, що досліджувався, та повітрям дозволило отримати спрощений вигляд перехідного режиму. Результати моделювання апробовано на прикладі викиду хлору із точкового джерела й показали, що вплив швидкості вітру на інтенсивність осадження набагато меншою у порівнянні з аміаком, що збільшує вагомість внеску процесу дифузії. Отримана модель дозволяє прогнозувати розміри зони хімічного ураження при аваріях з викидом важких газів при їх активному осадженні стаціонарними або мобільними розпилювачами. В якості стаціонарних розпилювачів можуть розглядатись водяні завіси на технологічних отворах об'єктів зберігання та експлуатації важких газів. В якості мобільних розпилювачів може розглядатись робота рятувальних підрозділів на місці аварії. Прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних газів дозволить підвищити точність проектування системи безпеки на таких об'єктах та допоможе у прийнятті ефективних рішень керівником ліквідації надзвичайної ситуації такого характеру.

Ключові слова: важкі гази, густина, примусове осадження, прогнозування наслідків аварії, рівняння Нав'є-Стокса, сорбція

1. Вступ

Ліквідація аварій на хімічних підприємствах є критично важливим завданням з кількох причин. Хімічні речовини, що використовуються на таких підприємствах, часто є токсичними, корозійними або вибухонебезпечними. Внаслідок аварії може статися викид шкідливих речовин в атмосферу, воду або ґрунт, що призведе до забруднення довкілля та загрози здоров'ю людей, які проживають поблизу. Хімічні аварії можуть спричинити значні екологічні наслідки, такі як загибель рослин і тварин, забруднення водних ресурсів та порушення природних екосистем. Ліквідація аварії дозволяє мінімізувати шкоду для довкілля та сприяє його відновленню. Також аварії на хімічних підприємствах, як правило, призводять до матеріальних збитків внаслідок руйнування обладнання, будівель та інфраструктури, а також втрати продукції. Швидка та ефективна ліквідація аварії допомагає зменшити ці збитки.

Аналіз причин аварії та проведення заходів з її ліквідації дозволяє виявити недоліки в системах безпеки та розробити заходи для їх усунення, що зменшує ризик повторних аварій.

Основні завдання ліквідації аварій на хімічних підприємствах спрямовані на локалізацію аварії, тобто зупинку подальшого поширення шкідливих речовин та запобігання їх потрапляння в навколишнє середовище. Ліквідація джерела аварії

проводиться шляхом усунення причин аварії, таких як витік хімічних речовин, пошкодження обладнання тощо. Невід'ємним етапом ліквідації аварій на хімічних підприємствах є надання медичної допомоги постраждалим та інформування населення про ситуацію та рекомендації щодо безпечної поведінки.

Останнім етапом ліквідації таких аварій є очищення території від шкідливих речовин та відновлення її безпечного стану.

Для ефективної ліквідації аварій на хімічних підприємствах необхідно мати план реагування та підготовлений персонал, здатний швидко та ефективно діяти в екстремальних ситуаціях.

Одним з основних методів ліквідації аварій з викидом небезпечних газів є осаджування хмари водою. Це дозволяє зменшити концентрацію небезпечного газу. Вода допомагає розбавити небезпечний газ, знижуючи його концентрацію в повітрі, що зменшує ризик отруєння. Додатковим механізмом може бути нейтралізація. Наприклад хлор реагує з водою, утворюючи хлоридну кислоту, яка менш небезпечна, ніж газоподібний хлор. Це допомагає зменшити агресивність хімічної речовини. Вода утворює бар'єр, що перешкоджає подальшому поширенню небезпечного газу в атмосфері, знижуючи ризик отруєння людей та зараження оточуючого середовища. Однак на ці процеси впливає велика низка фізичних та хімічних факторів, що суттєво ускладнює чисельне моделювання процесу. Хоча на сьогодні вже існує теоретичний та програмний апарат для прогнозування осадження небезпечних газів, всі вони спрямовані на гази легші за повітря.

Таким чином, проблема неможливості врахування процесів осадження небезпечних газів з густиною більше за повітря при прогнозуванні наслідків надзвичайних ситуацій є актуальною.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

По інформації з бюлетеня глобальних загроз [1] щорічно у світі виникає не менше 20 аварій на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО) [1]. Основною причиною виникнення таких аварій є порушення нормального ходу технологічного процесу внаслідок впливу людського фактору. Аварії на ХНО, звичайно супроводжуються розгерметизацією резервуарів, в яких знаходяться небезпечні хімічні речовини (НХР), що призводить до появи зони ураження великих розмірів й, як наслідок, значних людських жертв. 28 лютого 2019 року у штаті Алабама (США) стався витік хлору на підприємстві з водопостачання Birmingham Water Works, госпіталізовані понад 50 осіб [2]. Причиною витоку НХР в Birmingham Water Works називають випадкове змішування гіпохлориту натрію і сульфату заліза.

01 грудня 2021 року на території підприємства «Південьвійськбуд» (м. Одеса, вул. Боровського, 41а) стався витік хлору внаслідок розгерметизації ємності об'ємом 800 літрів [1]. Безпосередньо в зоні аварії гранично допустимі концентрації хлору було перевищено у 39 разів. Виток припинено шляхом накладання бандажу на ємність, що розгерметизувалася, дегазація місця розливу проведена шляхом осадження хлору розчином соди у воді.

24 лютого 2022 року розпочався відкритий воєнний напад Російської Федерації на Україну. Ймовірність появи аварій на ХНО з викидом НХР суттєво збільшилася.

Для оцінювання розміру зони хімічного забруднення є необхідним врахування певної кількості факторів, які доцільно умовно поділити на три блоки [3]:

- зовнішні метеорологічні умови, зокрема, температура та вологість повіт-

ря, швидкість та напрямок вітру, атмосферний тиск;

- властивості НХР, зокрема, від та агрегатний стан речовини, її фізико-хімічні параметри, умови її зберігання (температура, тиск) та інтенсивність викиду;
- параметри примусового осадження НХР, зокрема, вид та фізики-хімічні властивості рідини, що подається для осадження, площа осадження тощо.

Швидкість ліквідації аварії з викидом НХР суттєво залежить від управлінських рішень керівника ліквідації НС, вплив на які оказує точність прогнозування її розвитку.

Відомі різні математичні моделі розповсюдження НХР. Більшість з них базуються на розв'язанні рівнянь Гауса, наприклад модель, що використовується Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) [4]. Модель дозволяє розраховувати дисперсії на основі наявних метеорологічних параметрів при прямолінійній траєкторії розповсюдження хмари НХР. Модель призначена для експрес-оцінки наслідків аварій, що супроводжуються радіоактивним забрудненням на невеликих відстанях від осередку забруднення [5]. Основним недоліком моделі є складність розрахунку та необхідність введення значної кількості вхідної інформації про розвиток НС, що складно забезпечити в реальних умовах ліквідації НС.

В роботі [6] прогнозування наслідків забруднення атмосфери здійснюється на основі розрахунку динаміки розвитку аварії.

В роботі [7] при побудові моделі здійснюється з використанням рекурентного аналізу обробка значного масиву вихідної інформації про аварію. Недоліком побудованої моделі є залежність точності прогнозування від об'єму вихідних даних, збір яких є утрудненим в реальних умовах розвитку аварії.

Широко розповсюдженими є експрес-методи, що враховують лише найсуттєвіші фактори [8]. Такий підхід дозволяє спростити процедуру розрахунку та збільшити оперативність роботи, однак має недостатню точність прогнозування.

З фізичної точки зору осадження газів з атмосфери відбувається внаслідок процесу так званого міжфазового масообміну. Процес абсорбції газу рідкими аерозолями є складним й багатофакторним. Відомо декілька різних способів розв'язання цього завдання. Найбільш часто для побудови моделей використовують два способи: kinetic multilayer model for gas-particle (KM-GAP model, кінетична багат шарова модель) та molecular dynamics simulations (MD model, модель симуляції молекулярної динаміки) [9].

В роботі [10] запропонована методика прогнозування наслідків НС з викидом небезпечних газів, проведена перевірка працездатності запропонованих математичних моделей динаміки зміни концентрації небезпечних газів при їх активному осадженні. Недоліком запропонованої моделі є обмеження її працездатності газами, що є легшими відносно повітря.

Таким чином, нерозв'язаною частиною розглянутої проблеми є відсутність математичної моделі, яка адекватно описує розповсюдження важких небезпечних газів за умов їх примусового осадження.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка моделі примусового осадження дрібнодисперсними рідинними потоками небезпечних газів, з густиною більшою за повітря.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

1. Описати з використанням математичного апарату дифузійне розповсю-

дження небезпечних важких газів у повітрі за умов паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини.

2. Перевірити працездатність розробленої моделі на прикладі викиду хлору із точкового джерела.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес формування газової хмари при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин у вигляді важких небезпечних газів та її зміна при примусовому осадженні.

Предметом дослідження є параметри газової хмари при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин у вигляді важких небезпечних газів.

Гіпотезою дослідження є припущення про наявність гідродинамічних рис поведінки газів із густиною більшою за густину середовища розповсюдження та наявності моделей швидкості сорбції таких газів дисперсним потоком. Така залежність дозволить підвищити точність прогнозування розмірів зони хімічного ураження в умовах активного осадження стаціонарними та мобільними пристроями.

Для побудови дифузійної моделі розповсюдження та примусового осадження важких газів в атмосфері застосовуємо метод аналітичного розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з граничними умовами безперервності потоку газу з нульовою концентрацією у початковий етап часу у точці викиду та обмеженням поверхнею землі.

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple та MatLab.

5. Математичний опис дифузійного розповсюдження важких газів за умов їх примусового осадження

Розглянемо модель умовного процесу розповсюдження хмари важкого небезпечного газу з паралельним процесом осадження (рис. 1).

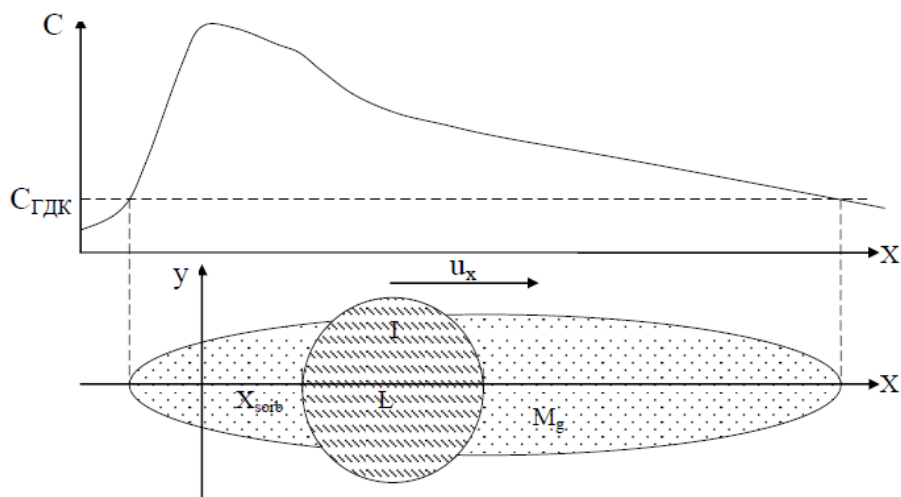


Рис. 1. Схема процесу осадження хмари важкого газу в атмосфері

Прийнемо точковий вигляд викиду газу (M_g) під тиском із технологічного апарату, в якому сталася розгерметизація. Витікання протікає з інтенсивністю q . Хмара розповсюджується за вітром із поступовим зменшенням концентрації C важкого газу. Межею хмари прийнемо граничну концентрацію, яка відповідає гранично допустимій концентрації (ГДК) ($C_{ГДК}$) важкого газу. Осадження відбувається за довільною інтенсивністю I з шириною зони осадження L , яка починається на довільній відстані від точки викиду X_{sorb} .

Нехай точка початку координат співпадає з джерелом викиду важкого газу (рис. 1). Тоді розповсюдження важкого газу в повітрі внаслідок викиду описується рівнянням масопереносу [9, 10]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u_x C) + \frac{\partial}{\partial y}(u_y C) + \frac{\partial}{\partial z}(u_z C) + \sigma C = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + q\delta(x)\delta(y)\delta(z), \quad (1)$$

де $C(x,y,z,t)$ – концентрація важкого газу у точці (x,y,z) в момент часу t , кг/м^3 ; $\sigma(x,y,z)$ – коефіцієнт, що враховує осадження важкого газу; (u_x, u_y, u_z) – вектор швидкості вітру; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$; q – інтенсивність викиду речовини, кг/с ; $\delta(x)$ – δ -функція Дірака.

Якщо осадження важкого газу відбувається в певній тривимірній області Ω , то коефіцієнт σ може бути представлений у вигляді:

$$\sigma(x, y, z) = \begin{cases} \sigma_0, & (x, y, z) \in \Omega; \\ 0, & (x, y, z) \notin \Omega. \end{cases}$$

$$\sigma = \frac{V_{\text{sorb}} \cdot M_g}{\rho_g},$$

де V_{sorb} – швидкість сорбції важкого газу за певних параметрів сорбенту та атмосфери [9, 10]; M_g – молярна маса важкого газу; ρ_g – густина важкого газу.

Коефіцієнти турбулентної дифузії в горизонтальному напрямку можуть бути визначені як:

$$\mu_x \approx \mu_y = k_0 u,$$

де $k_0 = (0,1 \div 1)$ м;

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}.$$

Коефіцієнт турбулентної дифузії у вертикальному напрямку залежить від стану атмосфери і описується залежністю:

$$\mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1}\right)^m,$$

де $k_1 = (0,1 \div 0,2)$ $\text{м}^2/\text{с}$; $m \approx 1$.

Особливістю розповсюдження важкого газу є те, що його густина є більшою за густину повітря (наприклад, густина хлору ($\rho_{\text{cl}} = 3,21 \text{ кг/м}^3$) в 2,6 рази більша за густину повітря ($\rho_a = 1,23 \text{ кг/м}^3$) [11]). Внаслідок цього важкий газ не розсіюється вгору, а опускається донизу.

Оскільки типові швидкості руху повітряних мас (10 м/с) є значно меншими від швидкості звуку в повітрі (343 м/с), то це дозволяє вважати газове середовище

нестисливим. В цьому випадку рівняння Нав'є-Стокса можуть бути записані у вигляді:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{cl}} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{cl}} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{cl}} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\rho_{cl} - \rho}{\rho_{cl}} g, \quad (4)$$

де P – відхилення тиску від величини атмосферного тиску P_0 ; ν – кінематична в'язкість, m^2/c ; g – прискорення вільного падіння; $\rho(x,y,z,t)$ – густина суміші повітря і важкого газу в заданій точці:

$$\rho = C + \rho_a \left(1 - \frac{C}{\rho_{cl}} \right). \quad (5)$$

Припустимо, що вітер має постійну швидкість і напрямок ($u_x = \text{const}$, $u_y = \text{const}$), а тиск однаковий у всій області, що досліджується. Тоді рівняння Нав'є-Стокса (2)–(4) спрощуються та мають вигляд:

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = \nu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) - \frac{\rho_{cl} - \rho}{\rho_{cl}} g. \quad (6)$$

Таким чином, розповсюдження важкого газу в повітрі описується системою двох диференціальних рівнянь (1) та (6) з умовою (5). Початковою умовою є відсутність важкого газу в повітрі в момент початку його витікання:

$$C(x, y, z, 0) = 0, \quad (7)$$

а крайовою умовою на поверхні землі – її непроникність для важкого газу:

$$\frac{\partial}{\partial z} C(x, y, 0, t) = 0. \quad (8)$$

Отримані вирази (1)–(6) дозволяють визначати динаміку хмари важкого газу в атмосфері при її активному осадженні.

6. Перевірка працездатності розробленої моделі на прикладі викиду хлору із точкового джерела

При застосуванні аналітичного методу розв'язання моделі (1–6) виникає проблема багато каскадного інтегрування, тому нами запропоновано використати метод скінчених різниць.

Метод скінчених різниць дозволяє математично описати закономірності розповсюдження хмари важкого газу у вигляді паралелепіпеда:

$$\Omega = [a_x, b_x] \times [a_y, b_y] \times [0, b_z],$$

за межами якого концентрація небезпечного газу не буде перевищувати $C_{ГДК}$ (наприклад для важкого газу хлор $C_{ГДК}=2 \text{ мг/м}^3$ [11]).

Розглянемо рівняння (1–6) у скінченному об'ємі Ω . Доповнимо умови (7) та (8) крайовими умовами 1-го роду на гранях паралелепіпеда:

$$\begin{aligned} C(a_x, y, z, t) &= C(b_x, y, z, t) = 0, \\ C(x, a_y, z, t) &= C(x, b_y, z, t) = 0, \\ C(x, y, b_z, t) &= 0. \end{aligned}$$

На рис. 2 побудовано тривимірну регулярну сітку в області Ω з кроком h за умови, що один з її вузлів знаходиться в точці викиду небезпечного газу (точці початку координат).

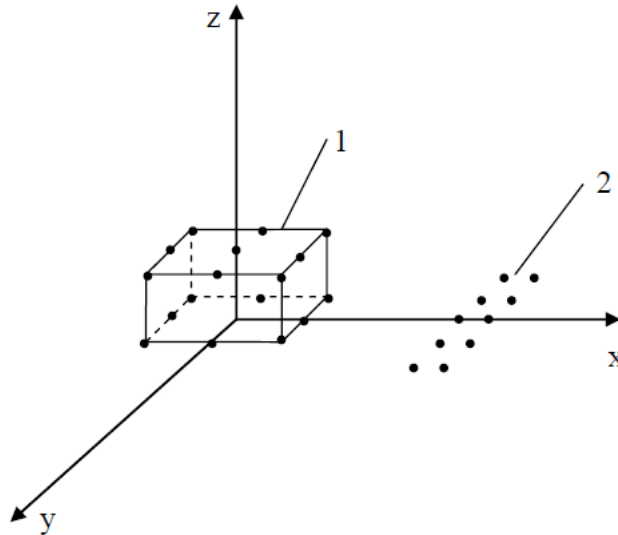


Рис. 2. Тривимірний регулярна сітка в області Ω розповсюдження небезпечного газу з кроком h (1 – паралелепіпед з точок, що є сусідніми з точкою викиду, 2 – вузли сітки, де здійснюється осадження небезпечного газу)

На рис. 2. у вузлах сітки навколо точки викиду вважаємо концентрації рівною небезпечного газу рівною $C_\infty(x, y, z)$:

$$C(x, y, z, t) = C_\infty(x, y, z).$$

У внутрішніх вузлах сітки диференціальне рівняння (1) замінимо на рівняння у скінчених різницях. В точці викиду небезпечного газу й у вузлах навколо неї заміну не здійснюємо. Апроксимуємо частинні похідні наступними виразами:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C(x_i, y_j, z_k, t_{m+1}) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{\Delta t},$$

де Δt – крок вздовж вісі часу.

$$\frac{\partial C}{\partial x} \approx \frac{\Delta_x C}{h} = \frac{C(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h},$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta_{xx} C}{h^2} = \frac{C(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) + C(x_{i-1}, y_j, z_k, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2},$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} \approx \frac{\Delta_y C}{h} = \frac{C(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h},$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx \frac{\Delta_{yy} C}{h^2} = \frac{C(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) + C(x_i, y_{j-1}, z_k, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2},$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} \approx \frac{\Delta_z C}{h} = \frac{C(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h},$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \approx \frac{\Delta_{zz} C}{h^2} = \frac{C(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) + C(x_i, y_j, z_{k-1}, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2}.$$

Рівняння (1) у скінченних різницях отримає наступний вигляд:

$$\frac{\Delta_\tau C}{\Delta t} = a \left(\frac{\Delta_{xx} C}{h^2} + \frac{\Delta_{yy} C}{h^2} + \frac{\Delta_{zz} C}{h^2} \right) - v_x \frac{\Delta_x C}{h} - \sigma(x, y, z) C, \quad (9)$$

З рівняння (9) видно, що збільшення в часі концентрації в точці (x_i, y_j, z_k) характеризується рівнянням:

$$\Delta_\tau C = a \frac{\Delta t}{h^2} (\Delta_{xx} C + \Delta_{yy} C + \Delta_{zz} C) - v_x \frac{\Delta t}{h} \Delta_x C - \sigma(x, y, z) C \Delta t, \quad (10)$$

з якого можна розрахувати концентрації в точках сітки в момент часу $(t + \Delta t)$:

$$C(x_i, y_j, z_k, t + \Delta t) = C(x_i, y_j, z_k, t) + \Delta_\tau C, \quad (11)$$

Отримані рівняння (10) та (11) дають можливість розрахувати у вузлах сітки величини концентрації небезпечного газу у будь-який момент часу t .

Для стійкого збігу процесу ітерації рівнянь (10) та (11) необхідно, щоб кроки вздовж осей часу та координат задовольняли умові Куранта-Фрідрікса-Леві:

$$\Delta t \leq \frac{h^2}{6a},$$

Розв'язання отриманих рівнянь здійснюється чисельно.

На рис. 3 представлено результати моделювання на прикладі небезпечного важкого газу хлор із активним його осадженням дрібнодисперсним потоком води. Приведений розподіл концентрації важкого газу хлор у просторі із активним його осадженням, що починається на відстані 10 м від точки викиду.

7. Обговорення результатів моделювання примусового осадження важких газів при їх розповсюдженні

Рівняння (1–6) є результатом розв’язання системи рівнянь Нав’є-Стокса за умов розповсюдження потоку з більшою густиною ніж середовище в якому це розповсюдження відбувається. Враховуючі, що концентрація важкого небезпечного газу зменшується від максимальної у точці викиду до нескінченно малого значення у просторі розповсюдження, то запропоновано ввести поняття межі зони розповсюдження, критерієм якою є гранично допустима концентрація небезпечного газу (рис. 1).

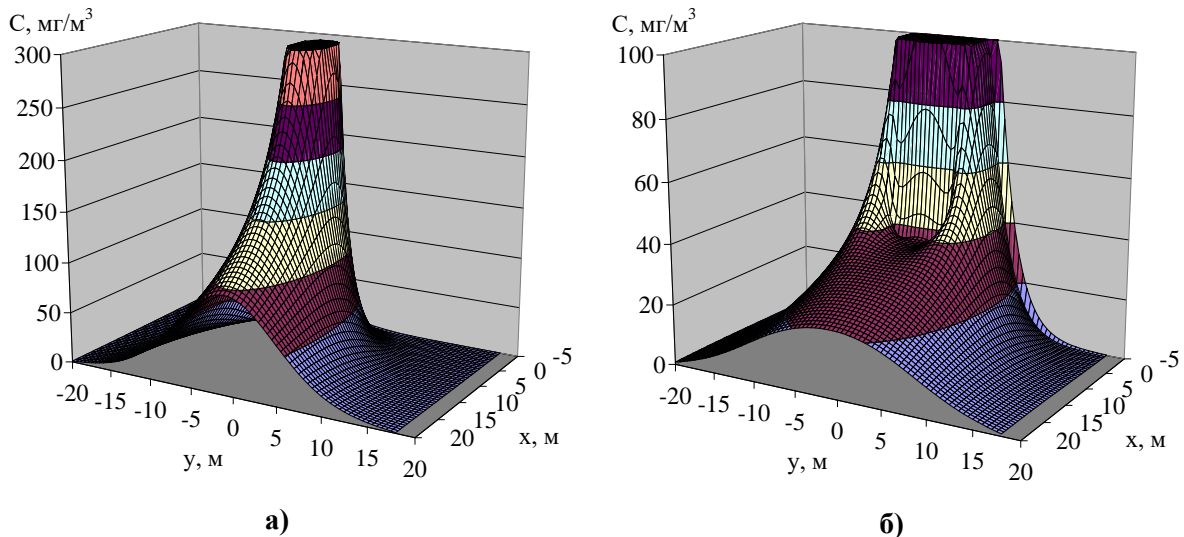


Рис. 3. Розподіл концентрації важкого газу у просторі на прикладі газу хлору: а – без осадження; б – з активним його осадженням дрібнодисперсним потоком води

З метою урахування процесу осадження запропоновано здійснювати поетапне розбиття зони хімічного зараження, що дозволяє використовувати спрощену модель для розрахунку із додаванням інтенсивності сорбції газу на етапі його осадження. У цьому випадку місце розташування та розміри зони осадження можна вважати довільними. Це є особливо важливим для гнучкості використання теоретичних результатів для вирішення прикладних задач. Так, наприклад, у випадку розгляду ситуації із стаціонарною водяною завісою на технологічних отворах реалізується випадок вузької (0,1–0,2м) зони осадження у безпосередній близькості до осередку викиду (<3м). Однак при розгляді процесу роботи підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту з мобільними розпилюючими пристроями (пожежними стволами) ситуація протилежна – ширина зони осадження > 10м із відстанню від джерела викиду > 5м, так як робота рятувальників у безпосередній близькості до джерела є небезпечною.

При моделюванні етапу осадження вирішальним є коефіцієнт σ , який визначається інтенсивністю сорбції важкого газу дисперсним потоком. Саме в цьому коефіцієнті враховується хімічна природа важкого газу та рідини осадження, дисперсність та інтенсивність потоку осадження та параметри середовища в якому протікає процес сорбції.

Аналітичний розв’язок рівнянь (1–6) не дав позитивного результату по причині необхідності використання багатокаскадного процесу інтегрування. Тому авторами в роботі використаний метод скінчених різниць, який дозволяє отримувати

вати не безперервну площину розподілу значень концентрації небезпечного газу, а розподіл вузлових точок (рис. 2). Даний метод дозволяє проводити чисельний розрахунок із використанням математичного пакету MatLab (рис. 3). Оператор може сам обирати за пріоритет або точність розрахунку збільшуючи кількість точок або оперативність розрахунку зменшуючи їх у межах виконання умов Куранта-Фрідрікса-Леві.

Результати чисельного моделювання (рис. 3) продемонстрували працездатність запропонованої моделі. За рахунок низького значення коефіцієнту дифузії хлору у повітрі за нормальних умов швидкість розповсюдження хлору на 65 % менша у порівнянні із аміаком. Також за рахунок високої густини хлору суттєво падає залежність швидкості розповсюдження небезпечної хмари від швидкості вітру. Для хлору цей показник складає 0,53, тоді як для аміаку він досягає 0,95.

Представлені на рис. 3 результати демонструють можливість зменшення розміру зону ураження небезпечної хімічної речовини хлор при її осадженні водою на 38 %, тоді як за тих же умов осадження та викиду розміри хмари аміаку знижуються у 2,6 разів.

Слід відмітити, що залежності, приведені на рис. 3, побудовано у припущенні відсутності горизонтальних повітряних потоків, що при суворому розгляді не відповідає дійсності. Однак виходячи з того, за статистичними даними у більшості випадків співвідношення швидкостей горизонтальних повітряних потоків до вертикальних знаходиться у діапазоні 1:7–1:16, на наш погляд їх виключення із розрахунку є не критичним. Додатковим фактором для підтвердження цього припущення є спрямованість моделі на розрахунок динаміки розповсюдження саме важких газів.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів та перевірки адекватності отриманої моделі необхідним є проведення лабораторних експериментальних досліджень.

8. Висновки

1. Побудовано математичну модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких газів (небезпечних хімічних речовин із густиною більшою за атмосферне повітря) за умов паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини. Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливістю побудованої моделі є врахування під час розповсюдження важкого газу процесу його примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини різної інтенсивності. При цьому осадження відбувається за рахунок процесів сорбції газів краплинами рідини. Модель дозволяє прогнозувати величину зони хімічного ураження при викиді небезпечних хімічних речовин у вигляді важких газів при їх активному осадженні стаціонарними та мобільними розпилювачами.

2. Працездатність побудованої моделі перевірена на прикладі викиду небезпечного важкого газу хлор із точкового джерела. Встановлено, що розповсюдження хлору має ознаки потоку рідини й тому отримана модель є перехідним варіантом між системами моделей дифузії газів та гідродинамічними моделями потоку рідин. Врахування припущення про нестискаємість газу за рахунок значної різниці швидкостей звуку між газом, що досліджувався, та повітрям дозволило отримати спрощений вигляд перехідного режиму. Внаслідок низького значення коефіцієнту ди-

фузії хлору у повітрі за нормальних умов швидкість розповсюдження хлору на 65 % менша у порівнянні із аміаком. Також внаслідок високої густини хлору суттєво падає залежність швидкості розповсюдження небезпечної хмари від швидкості вітру. Для хлору цей показник складає 0,53, для аміаку – 0,95. Таким чином, вплив швидкості вітру на осадження хлору є набагато меншим у порівнянні з аміаком, що збільшує вагомість внеску процесу дифузії. Зменшення розміру зони ураження хлору при його осадженні водою відбувається на 38 %, тоді як за аналогічних умов викиду та осадження аміаку розміри хмари зменшуються у 2,6 разів.

Для перевірки адекватності побудованої математичної моделі та підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів є необхідним проведення експериментальних досліджень.

Література

1. Global Hazards Weekly Bulletin. Public Health England. London, 2024. URL: <https://www.met.reading.ac.uk/~sgs02rpa/extreme.html>
2. Toxic gas at Birmingham water treatment plant sends 55 workers to hospitals. URL: <https://www.al.com/news/birmingham/2019/02/multiple-ambulances-called-in-hazmat-incident-at-birmingham-water-treatment-plant.html>
3. Talhofer V., Hořková-Mayerová Š. Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of Multi-Criterial Analysis. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8(4). P. 171. doi: 10.3390/ijgi8040171
4. Leelossy A., Jr F. M., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. Central European Journal of Geosciences. 2014. № 6. P. 257–278. doi: 10.2478/s13533-012-0188-6
5. Hoinaski L., Franco D., Lisboa H. Comparison of plume lateral dispersion coefficients schemes: Effect of averaging time. Atmospheric Pollution Research. 2016. № 7. P. 134–141. doi: 10.1016/j.apr.2015.08.004
6. Tatarinov V. V., Prus U. V., Kirsanov A. A. Decision support software for chemical accident elimination management. AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2195. P. 020076. doi: 10.1063/1.5140176
7. Martínez-García M., Zhang Y., Suzuki K., Zhang Y.D. Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17(2). P. 839–848. doi: 10.1109/TII.2020.3007152
8. Khan F., Rathnayaka S., Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection. 2015. Vol. 98. P. 116–147. doi: 10.1016/j.psep.2015.07.005
9. Kustov M., Melnychenko A., Basmanov O., Tarasenko O. Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2022. Vol. 1068. P. 239–247. doi: 10.4028/p-jdydlo
10. Melnichenko A., Kustov M., Basmanov O., Tarasenko O., Bogatov O., Kravtsov M., Petrova O., Pidpala T., Karatieieva O., Shevchuk N. Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 1(10(115)). P. 31–40. doi: 10.15587/1729-4061.2022.251675
11. Chlorine. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine>

A. Lesko¹, Adjunct

O. Kulakov¹, PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Department

S. Domoleha², Research Officer

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

²Research Institute of Military Intelligence, Kyiv, Ukraine

MODEL OF FORCED DEPOSITION OF HEAVY DANGEROUS GASES

A model of diffusion spreading in the atmosphere of dangerous chemicals with a density greater than atmospheric air is developed. The model was created by solving the Navier-Stokes equations with appropriate boundary conditions. The peculiarity of the obtained model is the consideration of the process of forced deposition of gas by a finely dispersed liquid flow of different intensity during gas propagation. In this case, deposition occurs due to the processes of gas sorption by liquid droplets. It is established that the propagation of heavy gases in the atmosphere shows signs of fluid flow, and the resulting model is a transitional option between systems of gas diffusion models and hydrodynamic models of fluid flow. Taking into account the assumption of gas incompressibility due to the significant difference in sound speeds between the gas under study and air allowed us to obtain a simplified view of the transient regime. The modelling results for chlorine emissions from a point source showed that the effect of wind speed is much smaller compared to ammonia, which increases the importance of the contribution of the diffusion process. The resulting model allows predicting the size of the chemical damage zone in the event of accidents involving the release of heavy gases with their active deposition by stationary and mobile sprayers. In practice, water curtains at the technological openings of heavy gas storage and operation facilities can be considered as stationary sprayers. The work of rescue units at the incident site can be considered as mobile sprayers. Refinement of the results of forecasting the consequences of emergencies involving the release of hazardous gases will improve the accuracy of the design of the safety system at such facilities and help in making effective management decisions in the elimination of emergencies of this nature.

Keywords: gas density, gas sorption, forced deposition, heavy gases, forecasting the consequences of an accident, Navier-Stokes equation

References

1. Global Hazards Weekly Bulletin. Public Health England. London. (2024). Available at: <https://www.met.reading.ac.uk/~sgs02rpa/extreme.html>
2. Toxic gas at Birmingham water treatment plant sends 55 workers to hospitals. Available at: <https://www.al.com/news/birmingham/2019/02/multiple-ambulances-called-in-hazmat-incident-at-birmingham-water-treatment-plant.html>
3. Talhofer, V., Hořková-Mayerová, Š. (2019). Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of Multi-Criterial Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 171. doi: 10.3390/ijgi8040171
4. Leelossy, A., Jr, F., Izsak, F., Havasi, A., Lagzi, I., Meszaros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Central European Journal of Geosciences*, 257–278. doi: 10.2478/s13533-012-0188-6
5. Hoinaski, L., Franco, D., Lisboa, H. (2016). Comparison of plume lateral dispersion coefficients schemes: Effect of averaging time. *Atmospheric Pollution Research*, 7, 134–141. doi: 10.1016/j.apr.2015.08.004
6. Tatarinov, V., Prus, U., Kirsanov, A. (2019). Decision support software for chemical accident elimination management. *AIP Conference Proceedings*, 2195, 020076. doi: 10.1063/1.5140176
7. Martínez-García, M., Zhang, Y., Suzuki, K., Zhang, Y. D. (2021). Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. *IEEE Civil Security*. DOI: 10.52363/2524-0226-2024-40-4

Transactions on Industrial Informatics, 17(2), 839–848. doi: 10.1109/TII.2020.3007152

8. Khan, F., Rathnayaka, S., Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 116–147. doi: 10.1016/j.psep.2015.07.005

9. Kustov, M., Melnychenko, A., Basmanov, O., Tarasenko, O. (2022). Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. *Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd*, 1068, 239–247. doi: 10.4028/p-jdydlo

10. Melnichenko, A., Kustov, M., Basmanov, O., Tarasenko, O., Bogatov, O., Kravtsov, M., Petrova, O., Pidpala, T., Karatieieva, O., Shevchuk, N. (2022). Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(115)), 31–40. doi: 10.15587/1729-4061.2022.251675

11. Chlorine. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine>

Надійшла до редколегії: 09.10.2024

Прийнята до друку: 15.11.2024