

## СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОБТ

УДК 504.05

М.І. Адаменко<sup>1</sup>, М.Ю. Яковлев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів*

<sup>2</sup> *Харківська державна академія фізичної культури, м. Харків*

### ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ В АТМОСФЕРІ ПРИ АВАРІЇ НА ХІМІЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

*У статті надається повний математичний опис розповсюдження хімічних речовин в атмосфері після викиду при аварії або надзвичайній ситуації на хімічному потенційно небезпечному об'єкті. Математичний апарат, який розроблено, враховує наявність джерел та відтоків забруднювача, особливі характеристики викиду та надає змогу розрахувати зміну концентрації забруднювача у будь-якій точці простору у будь-який момент часу.*

**Ключові слова:** *екологічна безпека, хімічне забруднення, аварія, хімічне виробництво, локалізація наслідків.*

#### Постановка проблеми

На території України розташована велика кількість промислових підприємств. Третина з них відноситься до потенційно небезпечних об'єктів, на яких виробляються, зберігаються та транспортується небезпечні хімічні речовини.

Ризик виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру постійно зростає, оскільки рівень зносу виробничого устаткування на більшості хімічних об'єктів наближається до критичного.

Аварії на таких об'єктах можуть супроводжуватись забрудненням навколишнього середовища небезпечними хімічними речовинами, а також пожежами та вибухами. При цьому площа зон забруднення буде вимірюватись квадратними кілометрами, а постраждале населення нараховуватиме тисячі чоловік.

Таким чином, постає наукова проблема щодо розробки заходів з ліквідації та локалізації аварій, пов'язаних з викидом (вилівом) небезпечних хімічних речовин, що передбачають не тільки наявність інформації про фізико-хімічні характеристики речовини, площу хімічного забруднення, але й відомості про концентрацію хімічної речовини в зоні забруднення.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблемам забруднення атмосфери від висотних джерел викиду, розповсюдження домішок у приземному шарі атмосфери вчені приділяли увагу протягом багатьох років. Перші теоретичні

дослідження з цього напрямку належать таким вченим, як А. Робертс, О. Сеттон. На сучасному етапі розвитку науки існують роботи, в яких за допомогою математичних моделей розглядаються питання забруднення навколишнього середовища від висотних джерел викиду, які представлені у роботах Берлянда М.Є., Бизової Н.Л., Колмогорова А.М., Марчука Г.І., Гаргера Є.К., Іванова В.М., Яглома А.М., Моніна А.С., Соловей В.В., Прохача Є.Ю., Беляєва М.М. та інших.

Отже, постає наукове завдання щодо розрахунку зон токсичного зараження, зон з нижніми та верхніми концентраційними межами зайняття, яка може бути використана для подальшого прийняття оперативного-тактичних рішень пожежно-рятувальними підрозділами МНС з метою захисту населення при ліквідації наслідків аварій з викидом (вилівом) хімічних речовин.

#### Мета статті

Метою статті є обґрунтування моделі поширення хімічних речовин в атмосфері після викидів при аварії або надзвичайній ситуації на хімічному потенційно небезпечному об'єкті та можливості розрахунку змін концентрації забруднювача в будь-якій точці простору в будь-який момент часу.

#### Виклад основного матеріалу

Аналітичну модель для опису просторового розподілу концентрації небезпечних хімічних

речовин можна розробити на основі загальної теорії механіки суцільних середовищ.

Небезпечна забруднююча хімічна речовина разом з повітрям створює двокомпонентну газову систему. Концентрація хімічної речовини, яка забруднює атмосферу, визначається її щільністю  $\rho_3(\vec{r}, t)$  (кг/м<sup>3</sup>) в двокомпонентній системі. Сумарна щільність  $\rho_\Sigma(\vec{r}, t)$  такої двокомпонентної системи дорівнює  $\rho_\Sigma = \rho_3 + \rho_n$ , де  $\rho_n(\vec{r}, t)$  – щільність повітря.

У двокомпонентному газі забруднення рухається зі швидкістю  $\vec{v}_3(\vec{r}, t)$ , а повітря – зі швидкістю  $\vec{v}_n(\vec{r}, t)$ . Поряд зі швидкостями  $\vec{v}_3$  та  $\vec{v}_n$  введемо також конвективну (загальну) швидкість  $\vec{V}_k(\vec{r}, t)$  двокомпонентного газу, що дорівнює

$$\rho_\Sigma \vec{V}_k = \rho_3 \vec{v}_3 + \rho_n \vec{v}_n. \quad (1)$$

Якщо двокомпонентна суміш перебуває у спокої, то  $\vec{V}_k = 0$ . Тоді згідно з (1), маємо

$$0 = \rho_3 \vec{v}_{3,d} + \rho_n \vec{v}_{n,d}, \quad (2)$$

де  $\vec{v}_{3,d}$  та  $\vec{v}_{n,d}$  – відповідно швидкості руху забруднюючої речовини та повітря у двокомпонентній системі, яка у цілому перебуває у стані спокою, тому що  $\vec{V}_k = 0$ .

Зміна концентрацій компонент у двокомпонентній системі, яка перебуває у стані спокою, називається дифузією. Дифузія обумовлена зустрічним рухом компонент з відповідними швидкостями  $\vec{v}_{3,d}$  та  $\vec{v}_{n,d}$ , які не дорівнюють нулю.

Явище дифузії забруднюючої речовини та повітря визначається відповідно векторами дифузії

$$\vec{i}_3 = \rho_3 \vec{v}_{3,d}, \quad \vec{i}_n = \rho_n \vec{v}_{n,d}. \quad (3)$$

Фізичною причиною дифузії є зустрічний тепловий рух молекул забруднювача та молекул повітря з середніми швидкостями  $\vec{v}_{3,d}$  та  $\vec{v}_{n,d}$ .

Виділимо у швидкостях руху забруднювача  $\vec{v}_3$  та повітря  $\vec{v}_n$  конвективну швидкість руху двокомпонентного газу  $\vec{V}_k$  та швидкості дифузійного руху рівностями

$$\vec{v}_3 = \vec{V}_k + \vec{v}_{3,d}; \quad \vec{v}_n = \vec{V}_k + \vec{v}_{n,d}. \quad (4)$$

Перейдемо до отримання повної системи рівнянь, яка описує зміну концентрації забруднювача у просторі та часі. Почнемо із закону

збереження маси забруднювача, який з урахуванням (3) та (4) можна записати у вигляді

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div} \rho_3 \vec{V}_k - \text{div} \vec{i}_3 + Q_3, \quad (5)$$

де  $Q_3(\vec{r}, t)$  дає зміну маси забруднювача в одиниці об'єму в одиницю часу за рахунок наявності у ньому джерел та стоків забруднювача. Закон збереження маси для повітря одержимо з (5) шляхом заміни індексу «з» на індекс «п».

Рух двокомпонентного газу як цілого з конвективною швидкістю  $\vec{V}_k$  описується рівнянням Нав'є – Стокса.

Закон збереження енергії двокомпонентного газу разом з законами збереження маси та рівнянням Нав'є – Стокса створюють повну систему з п'яти рівнянь, які дозволяють знайти концентрацію забруднювача  $\rho_3(\vec{r}, t)$ .

Вираз для вектора дифузії  $\vec{i}_3$  записується з простих феноменологічних міркувань

$$\vec{i}_3 = D_{II} \rho_\Sigma \nabla \frac{\rho_3}{\rho_\Sigma} - K_T \nabla T - K_P \nabla P, \quad (6)$$

де  $T$  та  $P$  – відповідно температура та тиск двокомпонентного газу.

Перші доданки у правій частині рівності (6) описують дифузію, що обумовлена залежністю  $\rho_3$  від  $\vec{r}$ , другі – термодифузію, треті – бародифузію. Коефіцієнт дифузії  $D$  – позитивний, а коефіцієнт термодифузії  $K_T$  та коефіцієнт бародифузії  $K_P$  можуть бути як позитивні, так і негативні.

При заданих початкових та граничних умовах рішення системи п'яти рівнянь, які згадувались раніше, з урахуванням рівності (6) дозволяє знайти концентрацію забруднювача  $\rho_3(\vec{r}, t)$  у будь-якій точці простору та у будь-який момент часу. Загальне рішення такої задачі у теперішній час отримати неможливо. Розвиток сучасних комп'ютерних технологій дозволяє для кожного конкретного випадку одержати числове рішення для функції  $\rho_3(\vec{r}, t)$ . Між тим безумовні переваги мають аналітичні рішення задачі про розповсюдження забруднення, які можна отримати в умовах наявності низки припущень, що суттєво спрощують рівняння.

Перше рішення впливає з рівності (6), яка дозволяє запропонувати термодифузійний спосіб розподілу забруднень. Нехай у початковий момент часу  $t = 0$  в якійсь області простору концентрація забруднювача буде однакою у всіх точках простору, тобто  $\rho_3$  не залежить від координати  $\vec{r}$ . Крім того двокомпонентний газ покоїться, тобто  $\vec{V}_k = 0$ .

При цьому виникають завдання з усунення або збирання забруднювача в якійсь області простору, де він буде дезактивований або видалений з області

простору [4]. Рішення цих задач впливає з рівності (6).

Якщо в якійсь області концентрація забруднювача та тиск постійні, то перший та третій доданки у правій частині рівності (6) дорівнюють нулю. Помістимо у просторі тверде тіло, яке нагріто до деякої температури, що перевищує температуру навколишнього двокомпонентного газу. Тоді у просторі виникне градієнт температури, який згідно з (6) приведе до руху забруднювача у просторі. Якщо температуру твердого тіла підтримувати постійною, то після деякого часу настане стаціонарний стан, при якому  $\vec{i}_3$  обернеться на нуль.

Згідно з (6) стаціонарний стан при заданому градієнті температури можливий тільки за умов, що є градієнт забруднювача. При цьому розподіл концентрації забруднювача  $\rho_3(\vec{r}, t)$ , що виникає у просторі, впливає з рівності (6), в якій  $\vec{i}_3$  дорівнює нулю. Врешті-решт маємо

$$D\rho_\Sigma \nabla \frac{\rho_3}{\rho_\Sigma} = -K_T \nabla T. \quad (7)$$

Якщо забруднювач такий, що  $K_T > 0$ , то область навкруги нагрітого твердого тіла очиститься від забруднювача. Якщо  $K_T < 0$ , то забруднювач буде сконцентрований навкруги нагрітого твердого тіла, де можна його дезактивувати. При дезактивації рівність (7) буде порушуватися. У цих умовах нові порції забруднювача будуть підходити до нагрітого твердого тіла, поблизу якого можливо продовжувати його дезактивацію. Безумовно, замість нагрітого твердого тіла можливо використати навіть багаття.

Для термодифузійного розподілу забруднювача можливо також використати охолоджене тверде тіло або якусь область простору, в якій температура нижче, ніж температура навколишнього двокомпонентного газу. У цьому випадку, коли  $K_T > 0$ , забруднювач збереться навколо охолодженої області простору, а при  $K_T < 0$ , охолоджена область очиститься від забруднювача.

Розглянемо рішення інших задач, виходячи з рівняння (5). На жаль, у загальному випадку рівняння (5) не можна розв'язувати окремо від решти рівнянь повної системи, тому що поруч з  $\rho_3$  воно містить також швидкість  $\vec{V}_k$ , повну щільність  $\rho_\Sigma$ , тиск  $P$  та температуру  $T$ .

Між тим, якщо зробити низку припущень, які спрощують задачу [5], то рівняння (5) можна вирішувати, не враховуючи решту рівнянь повної системи. Будемо вважати, що внесок термодифузії та бародифузії у зміну концентрації забруднювача  $\rho_3(\vec{r}, t)$  малий. Не будемо враховувати залежність

від координати  $\vec{r}$  сумарної щільності. Швидкість конвективного руху  $\vec{V}_k$ , що міститься в (5), будемо вважати відомою. Це може бути, зокрема, швидкість вітру, що вимірюється незалежно.

Якщо з урахуванням цих припущень підставити (6) у (5), то одержимо відносно шуканої концентрації забруднювача  $\rho_3(\vec{r}, t)$  рівняння

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \rho_3 \operatorname{div} \vec{V}_k + \vec{V}_k \nabla \rho_3 - D \Delta \rho_3 = Q_3. \quad (8)$$

Виходячи з рівняння (8), можна одержати аналітичне рішення низки задач, які реалізуються на практиці. Розглянемо одну з них. Будемо вважати, що вітер відсутній, тобто  $\vec{V}_k = 0$ , а також що стоки забруднювача лінійно залежать від концентрації, тобто  $Q_3 = -\sigma \rho_3(\vec{r}, t)$ , стоки забруднювача виникають, коли відбуваються спонтанний розпад забруднювача або реакція забруднювача з компонентами зовнішнього середовища, внаслідок якої забруднювач знищується. Коефіцієнт пропорційності  $\sigma$  передбачається постійним та позитивним.

Зроблені припущення дозволяють записати рівняння (8) у вигляді

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = D \Delta \rho_3 - \sigma \rho_3. \quad (9)$$

Рівняння (9) повинно бути доповнено початковими умовами, які задають розподіл концентрації забруднювача у початковий момент часу  $t=0$ . Рішення рівняння (9) з початковою умовою  $\rho_{03}(\vec{r})$  можна отримати, якщо функцію  $\rho_3(\vec{r}, t)$  подати у вигляді інтеграла Фур'є. Врешті-решт маємо

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{e^{-\sigma t}}{8(\pi D t)^{3/2}} \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{03}(\vec{r}') e^{-\frac{(\vec{r}-\vec{r}')^2}{4D t}} d^3 r'. \quad (10)$$

Результат (10) вирішує поставлену задачу. З рішення (10) випливає, що концентрація забруднювача за рахунок спонтанного розпаду та взаємодії з довкіллям експоненціально зменшується. Подальше дослідження рішення (10) зручно провести в моделі простої початкової умови, коли в початковий момент часу маса забруднювача  $M$  знаходиться у малому об'ємі, який міститься на початку координат. Така початкова умова апроксимується дельта-функцією з множником  $M$ , тобто  $\rho_{03}(\vec{r}) = M \delta(\vec{r}')$ .

Підставляючи цю початкову умову в (10), отримаємо

## Список літератури

$$\rho_3(\vec{r}, t) = \frac{M}{8(\pi Dt)^{3/2}} e^{-\sigma t} e^{-\frac{r^2}{4Dt}}. \quad (11)$$

Згідно з рішенням (11) в певний фіксований момент часу  $t$  характерна область, в якій буде помітна кількість забруднювача, що не розпався, визначається розміром  $L_3$ , при якому показник другої експоненти порядку одиниці, тобто  $L_3 \approx 2\sqrt{Dt}$ . При цьому у всіх точках простору зменшення концентрації забруднювача за рахунок розпаду визначається множителем  $e^{-\sigma t}$ . Рішення (11) та оцінки, які випливають з нього, дозволяють в досить загальних випадках прогнозувати розповсюдження забруднення у просторі та у часі.

## Висновки

Отже, математичний апарат, який розроблено, враховує наявність джерел та відтоків забруднювача, особливі характеристики викиду та надає змогу розрахувати зміну концентрації забруднювача у будь-якій точці простору, у будь-який момент часу.

1. Євдікін О.М. [та ін.]. *Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій: в 2 т./* О.М. Євдікін, В.В. Могильниченко, М.А. Скидан, Е.О. Рибаківа. – К.: КІМ, 2007. – Т. 1: *Техногенна та природна безпека.* – 2007. – 636 с.

2. Гишко Г.Б. *Анализ результатов эксперимента по определению концентрации хлорпикрина в воздухе /* [Г.Б. Гишко, О.В. Захаренко, А.П. Созник и др.] // *Проблеми надзвичайних ситуацій: зб. наук. праць УЦЗ України.* – Харків: УЦЗУ, 2006. – Вип. 5. – С. 60-65.

3. Шляхов Н.А. *Оценка характерных опасных расстояний при ликвидации аварий на химических предприятиях /* Н.А. Шляхов, А.П. Созник, О.В. Захаренко // *Проблеми надзвичайних ситуацій : Зб. наук. пр.* – Харків: Фолио, 2008. – Вип. 8. – С. 17-28.

4. Биченок М.М. *Проблеми інформатизації в сфері екологічної безпеки /* М.М. Биченок // *Стохастические задачи теории оптимизации и надежности.* – 1994. – № 4. – С. 29-34.

5. Адаменко М.І. *Теоретичні основи та методи забезпечення своєчасного виявлення надзвичайної ситуації шляхом підбору систем спостереження та сповіщення за критерієм максимальної безвідмовності /* М.І. Адаменко // *Системи обробки інформації.* – 2009. – Вип. 2 (76). – С. 129-134.

**Рецензент:** М.М. Пеліхатий, д.ф.-м.н., с.н.с., Харківський національний університет, Харків.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ПРИ АВАРИИ НА ХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Н.И. Адаменко, М.Ю. Яковлев

*В статье дается полное математическое описание распространения химических веществ в атмосфере после выбросов при аварии или чрезвычайной ситуации на химическом потенциально опасном объекте. Математический аппарат, который разработан, учитывает наличие источников и оттоков загрязнителя, особые характеристики выбросов и предоставляет возможность рассчитать изменение концентрации загрязнителя в любой точке пространства в любой момент времени.*

**Ключевые слова:** экологическая опасность, химическое загрязнение, авария, химическое производство, локализация следствий.

### THEORETICAL BASES OF CALCULATION OF DISTRIBUTION OF CONTAMINATION IN AN ATMOSPHERE AT AN ACCIDENT ON CHEMICAL PRODUCTION

N. Adamenko, M. Jakovlev

*A complete mathematical description of chemical substances distribution in an atmosphere as a result of emission at accident or contingency on chemical potentially dangerous object is given in the article. The developed mathematical tool takes into account the presence of sources and outflows of pollutant, special parameters of emissions and gives possibility to calculate a change of concentration of pollutant in any point of space at any moment of time.*

**Keywords:** environmental hazard, chemical contamination, accident, chemical production, localization of consequences