

## ЗАПОБІГАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

УДК 351.86

Н.Г. Кучук

*Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків*

### МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ

*Розглянуто метод моделювання процесу розповсюдження шкідливих викидів, котрий дозволяє проводити моделювання у режимі реального часу з постійним уточненням моделі на основі постійно надходячих вхідних даних з різноманітних датчиків. Відмінність пропонуємої моделі від існуючих полягає в тому, що вона відносно проста, придатна для практичних розрахунків в режимі реального часу і також враховує найбільш істотні фактори, що визначають розсіювання забруднюючих речовин у навколишньому середовищі. Це дозволяє отримати інформацію для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації за більш короткий час.*

**Ключові слова:** надзвичайна ситуація, математична модель, шкідливі речовини, навколишнє середовище.

#### Вступ

За останні роки зріс інтерес до побудови математичних моделей процесів антропогенного та техногенного забруднення, на базі яких розробляються алгоритми щодо прогнозу, економічної оцінки та ліквідації можливих наслідків. З точки зору системного аналізу, дослідження процесу поділяють на три етапи: постановка завдання, моделювання та аналіз, прийняття рішення. При постановці завдання визначається мета дослідження, критичні елементи та їх взаємодії. Постановка завдання, як правило, уточнюється в процесі дослідження. Завдання і проблеми, що виникають при моделюванні, становлять головний предмет подальшого вивчення.

Спочатку відбувається збір інформації про надзвичайну ситуацію. Це інформаційна складова і загальна картина події. В свою чергу, загальна картина події впливає на вибір вихідної інформації і на формування моделі. Первинна перевірка моделі встановлює, чи надзвичайна ситуація спостерігалася раніше і носить пояснювальний характер, чи вона відноситься до ситуацій, що раніше не спостерігалися і використовується для передбачення нових наслідків. На основі розрахованих даних про розвиток наслідків надзвичайної ситуації, модель змінюється, і процес дослідження повторюється. Даний процес можна назвати циклічним. Отже, будь-яка математична модель визнається лише тимчасовою. Такий процес триває весь час, тому зростає необхідність у даних, що постійно обновлюються, та завдяки цьому підвищується здатність моделі показати реальні наслідки надзвичайної події для подальшої ліквідації.

**Мета статті:** розробити метод моделювання процесу розповсюдження шкідливих викидів, котрий дозволить проводити моделювання у режимі реального часу з постійним уточненням моделі на

основі постійно надходячих вхідних даних з різноманітних датчиків, щоб в кінцевому рахунку постійно отримувати інформацію про реальні наслідки надзвичайної ситуації з метою прийняття оперативних рішень щодо їх ліквідації.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Протягом останніх років було докладено багато зусиль, щоб розвинути галузь екологічної безпеки. Антропогенне і техногенне навантаження на атмосферне повітря в Україні у кілька разів перевищує відповідні показники у розвинутих країнах світу. Основними забруднювачами атмосферного повітря залишаються підприємства чорної металургії, теплової енергетики, вугільної, нафтогазовидобувної, цементної промисловості, викиди забруднюючих речовин яких складають майже 90 % від загального обсягу викидів в атмосферне повітря в Україні.

У розрізі галузей економіки найбільша частка викидів забруднюючих речовин – 43,4% (без урахування діоксиду вуглецю), припадає на виробництво і розподіл електроенергії, газу, води [1]. Серед регіональних джерел небезпеки, що становлять найбільшу загрозу на території України, вирізняються хімічно небезпечні об'єкти, напірні греблі на гідровузлах і сейсмічно активні регіони [2].

На хімічно небезпечних об'єктах виробляються, використовуються, зберігаються чи перевозяться сильнотоксичні отруйні речовини. До цих об'єктів відносяться: заводи і комбінати хімічної і нафтопереробної промисловості; агропромислові і торгові підприємства з холодильними установками, на яких використовують в якості хладореагента аміак; водонапірні станції й очисні споруди, де застосовують хлор; склади з ядохімікатами для дезинсекції і дератизації запасів зерна і продуктів його переробки; транспортні засоби, включаючи контейнери і налив-

ні потяги, автоцистерни, річкові і морські танкери, що перевозять сильнодіючі отруйні речовини.

З другої половини XX століття спостерігається зростання кількості хімічно небезпечних аварій в усьому світі [3]. Це пов'язано зі збільшенням масштабів і складності хімічних виробництв при недостатньому забезпеченні їхньої безпеки. В Україні знаходиться понад 1,5 тис. хімічно небезпечних об'єктів, що використовують близько 300 тис. тонн різних сильнодіючих отруєних речовин [4]. Хімічно небезпечні аварії відбуваються в результаті:

- пошкодження технологічного устаткування або порушення герметичності ємностей для зберігання чи транспортування сильнодіючих отруєних речовин;
- несправностей у системі запуску, контролю і зупинки технологічних процесів;
- помилок виробничого персоналу;
- руйнівних природних явищ, включаючи землетруси, повені й урагани;
- диверсій чи військових операцій.

При аварії з викидом чи розливом сильнодіючих отруйних речовин головним уражаючим фактором є зараження приземного шару атмосфери газами чи парами хімічно небезпечної речовини, що призводить до появи зон хімічного зараження. У залежності від концентрації сильнодіючих отруєних речовин розрізняються зони, у межах яких можлива масова загибель людей, і зони, де люди тимчасово втрачають працездатність. У зазначених зонах можливе, також, зараження водних джерел, продуктів харчування, будинків і споруд, технологічного обладнання тощо.

## Результати досліджень

Поведінка забруднюючих речовин в навколишньому середовищі може бути різною у залежності від джерела надходження. Кожне з джерел забруднює навколишнє середовище як в умовах нормальної експлуатації, так і при аваріях і катастрофах.

Також екологічну небезпеку складають і викиди в атмосферу, скидання у водойми забруднюючих речовин з промислових об'єктів при їхній нормальній експлуатації, поширюючись на дуже великі відстані від джерела небезпеки, створюють локальне і регіональне поле забруднення природного середовища.

Існує безліч факторів, що впливають на розмір і на форму зон небезпеки, що виникають внаслідок викиду парів і газів в атмосферу. Як у випадку надзвичайної ситуації, так і у випадку безперервних викидів, розміри зон небезпеки залежать від кількості шкідливих речовин та їх сполук. Слід відмітити, що важливі розміри площі випаровування, пару або газу які потрапляють в атмосферу з калюжі розлиття. Також велике значення в момент викидів шкідливих речовин мають час дня, температура по-

вітря, сонячне освітлення в місцевості, ступінь хмарного покриття і сила вітру. Вони відіграють головну роль у визначенні рівня дисперсності атмосфери і, таким чином, на величину відстаней можливих зон екологічного забруднення.

Гази, маса яких більше ніж повітря, будуть прагнути опуститися на землю. Але слід відзначити і те, що шкідливі пари розбавляються повітрям, в деякий час вони починають поводитися як гази, близькі по щільності до повітря. Таким чином, розгляд дисперсії важких газів або парів більш важливий для високих концентрації поблизу джерела забруднення.

При аварії на виробництві викиди шкідливих речовин можуть здійснюватися через труби, вихлопні клапани тощо. В цьому випадку концентрація та розповсюдження шкідливих речовин може значно відрізнятись від такого ж самого джерела небезпеки але на поверхні землі. Максимальна концентрація буде знаходитися по центру розповсюдження хмари викиду за напрямком вітру.

Поширення шкідливих речовин в навколишньому середовищі визначається двома основними процесами: конвективним переносом внаслідок усередненого руху середовища і дифузією за рахунок турбулентності. Отже, дана математична модель повинна враховувати як поле середніх швидкостей, так і характеристики турбулентної дифузії [5].

Система рівнянь, що описують в часі всі деталі еволюції поля швидкостей і концентрацій при практичній реалізації, особливо, якщо необхідно у режимі реального часу здійснювати введення об'єктивних даних, отриманих з датчиків, для уточнення моделі, не може бути вирішена за допомогою сучасних обчислювальних засобів. В цьому разі можливо оперувати в моделі рівняннями усередненого руху, якими визначається розподіл осереднених за часом величин. При цьому час осереднення повинен бути набагато більшим часового масштабу турбулентності, але набагато меншим часового масштабу усередненого течії (наприклад, добового циклу в приграничному шарі атмосфери). Рівняння усередненого руху повинні містити складові, що описують турбулентний перенос. Для замикання системи рівнянь (тобто для її вирішення) ці складові повинні бути апроксимовані за допомогою певної моделі турбулентності.

Задача поширення викидів в атмосфері може бути визначена як рішення за певних початкових і граничних умовах такого диференціального рівняння для усереднених значень швидкостей і концентрації шкідливої речовини  $j$  [6]:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + U_{jx} \cdot \frac{\partial C_j}{\partial x} + U_{jy} \cdot \frac{\partial C_j}{\partial y} + U_{jz} \cdot \frac{\partial C_j}{\partial z} = S_j + \frac{\partial \left( K_{jx} \frac{\partial C_j}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left( K_{jy} \frac{\partial C_j}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( K_{jz} \frac{\partial C_j}{\partial z} \right)}{\partial z}, \quad (1)$$

де  $C_j = C_j(x, y, z)$ ,  $U_j = (U_{jx}, U_{jy}, U_{jz})$  – середні значення концентрації речовини і швидкості потоку;  $K_j = (K_{jx}, K_{jy}, K_{jz})$  – вектор коефіцієнтів турбулентної дифузії (зазвичай враховується по трьох осях –  $x, y, z$ ),  $S_j$  – функція джерел, що описує швидкість зміни об'ємної концентрації за рахунок розпаду або хімічних перетворень речовин.

При вирішенні практичних завдань вигляд рівняння (1) можна спростити. Зазвичай вісь  $x$  орієнтована у напрямку середньої швидкості вітру, тому  $U_y = 0$ . Компонента  $U_z$  складається з вертикальної компоненти швидкості вітру і вертикальної швидкості усередненого руху шкідливих речовин, які можуть або спливати, або осідати, якщо домішка, відповідно, легше чи важче навколишнього повітря. Середні значення вертикального руху повітряних мас над горизонтальною однорідною підстильною поверхнею малі, тому можна прийняти, що в разі легкої домішки, що не має власної швидкості вертикального переміщення,  $U_z = 0$ . Якщо ж розглядається важка домішка, що поступово осідає, то  $U_z$  є швидкістю осадження (яка входить в рівняння зі знаком мінус). При наявності вітру можна знехтувати членом з  $K_x$ , що враховує турбулентну дифузію по осі  $x$ , оскільки в цьому напрямку дифузійний потік домішки значно менше адвективного (за рахунок середньої складової вітру). Найбільше застосування отримало рівняння розсіювання консервативних шкідливих речовин ( $S_j = 0$ ) при стабільних погодних умовах над рівною горизонтальною поверхнею (вертикальна складова швидкості вітру, що входить до  $U_x$ , дорівнює нулю) від джерела з постійними параметрами викидів:

$$U_{jx} \cdot \frac{\partial C_j}{\partial x} - w_{jz} \cdot \frac{\partial C_j}{\partial z} = \frac{\partial \left( K_{jy} \frac{\partial C_j}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left( K_{jz} \frac{\partial C_j}{\partial z} \right)}{\partial z}, \quad (2)$$

де  $w_{jz}$  – швидкість переміщення шкідливої речовини у вертикальній площині.

Для вирішення рівнянь (1) або (2) необхідно знати граничні умови. Вони полягають у тому, що на всіх поверхнях, котрі обмежують дану область розрахунку, необхідно знати або потік домішки (дифузійний та адвективний), або її концентрацію. У літературі зустрічається багато варіантів для формування граничних умов [5 – 7]. Конкретний вибір умов залежить від виду джерела викидів та від припущень, покладених в основу рівнянь, що описують атмосферну турбулентність і умови на границях розрахункової області.

Найбільш поширеними джерелами викидів є труби промислових підприємств, які з достатнім рівнем наближення можна розглядати як точкові джерела. При наявності точкового джерела з координатами  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = H$  (труба висотою  $H$ ) на кордоні області розрахунків в якості граничного умови приймається:

$$U_j(x=0) \quad C_j = M_j \cdot \delta(y) \cdot \delta(z - H), \quad (3)$$

де  $M_j$  – потужність викиду речовини джерела (кількість речовини в одиницю часу),  $\delta(\bullet)$  – дельта-функція Дірака.

У загальному випадку в умовах квазістаціонарності процесу потужність викиду  $M$  може розглядатися як функція часу  $t$ .

Граничні умови на нескінченному віддаленні від джерела приймаються відповідно до природним припущенням про те, що концентрація на великих відстанях від джерела убуває до нуля:

$$C_j \xrightarrow{|x| \rightarrow \infty; |y| \rightarrow \infty; |z| \rightarrow \infty} 0. \quad (4)$$

Загальний вираз граничної умови на підстильній поверхні має такий вигляд:

$$K_{jz} \frac{\partial C_j}{\partial z} - C_j \cdot (b - v_{jz}) \Big|_{z=0} = 0, \quad (5)$$

де  $v_{jz}$  – швидкість гравітаційного осадження,  $b$  – параметр, що визначає характер взаємодії шкідливої речовини з поверхнею. Він змінюється між двома граничними значеннями:  $b_{\min} = 0$  і  $b_{\max}$ .

Випадок  $b_{\max}$  відповідає повному поглинанню шкідливої речовини поверхнею. При цьому гранична умова (5) перетворюється на більш просте:

$$C_j = 0 \quad \text{при } z = 0.$$

При формулюванні граничної умови на підстильній поверхні виділяють випадки, коли домішки поширюються над водною поверхнею. У більшості випадків вода поглинає шкідливі речовини за рахунок розчинення, тому для концентрації безпосередньо у її поверхні часто виконуються ці граничні умови.

Випадок  $b_{\min} = 0$  при  $v_{jz} = 0$  відповідає повному відображенню шкідливої речовини від поверхні. З поверхнею ґрунту домішки, зазвичай, слабо взаємодіють, тому, потрапивши на неї, домішки не накопичуються, а з турбулентними вихорами знову вертаються до атмосфери. Часто з достатньою точністю приймається, що середній турбулентний потік у землі малий, тобто

$$K_{jz} \frac{\partial C_j}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0. \quad (6)$$

Початкові умови повинні задавати концентрацію шкідливої речовини в області розрахунків в початковий момент часу. Найпростіші з них такою шкідливою речовиною в початковий момент в розрахунковій області відсутня, тоді при  $t = 0$   $C(x, y, z) = 0$ , або концентрація шкідливої речовини дорівнює фоновій СФ, тоді при  $t = 0$   $C(x, y, z) = CФ$ .

Існують і більш складні види граничних умов, які зазвичай формуються в зв'язку з конкретними постановками завдання дифузії шкідливих викидів в атмосфері. Важливо також знати, що, крім пари і газів, вітром, уздовж його напрямку, можуть поширюватися дими, тумани, аерозолі, а також пилу та порошки. Деякі викиди містять суміші хімічних парів,

аерозолів і пилу. Великі за розмірами і за масою крапельки рідини та тверді частинки можуть «випадати» з хмар та шлейфів на поверхню землі поблизу їх джерел. Дрібні ж частинки проходять такі ж відстані, як і самі пари і гази. Краплі летючих рідин можуть випаровуватися як під час перенесення вітром, так і після випадання на поверхню землі. Вони можуть також змусити хмару або шлейф вести себе так, як ніби він важчий за повітря, у той час як в чисто газоподібному вигляді вони були б легше повітря і нейтрально плаваючими. Всі ці явища впливають на навколоземну концентрацію забруднюючого газу, загалом приводячи до наслідків понад ті, що були передбачені у відсутності туманів, димів, аерозолів або пилу.

Пар або газ може викидатися в атмосферу і у вигляді струменя під високим тиском. Сильний струмінь пари або газу спочатку викликає швидке перемішування, приводячи, таким чином, до зменшення концентрації небезпечного газу або речовини. Однак далі, коли хмари або шлейфи рухаються у напрямку вітру, цей фактор стає менш значущим.

Реальна поверхня, на якій відбувається розсіювання газу, в різних місцевостях не є рівною. Такі топографічні особливості впливають на те, як поширюються небезпечні речовини. У більшості випадків кількість та величина пагорбів на місцевості сприяють прискоренню змішування газу з повітрям і розсіюванню. Напрямок вітру у момент викиду майже завжди змінюється, це необхідно враховувати при ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, тому що зона ураження, що потребує допомоги, значно більше зон, що були передбачувані завдяки методу оцінки дисперсії. Це може потребувати додаткових зусиль для ліквідації наслідків катастрофи.

## Висновки

В статті розглянуто метод моделювання процесу розповсюдження шкідливих викидів, котрий дозволяє проводити моделювання у режимі реального часу з постійним уточненням моделі на основі постійно надходячих вхідних даних з різноманітних датчиків.

## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Н.Г. Кучук

*Рассмотрен метод моделирования процесса распространения вредных выбросов, который позволяет проводить моделирование в режиме реального времени с постоянным уточнением модели на основе постоянно поступающих входных данных из различных датчиков. Отличие предлагаемой модели от существующих состоит в том, что она относительно проста, пригодна для практических расчетов в режиме реального времени и также учитывает наиболее существенные факторы, которые определяют рассеивание загрязняющих веществ в окружающей среде. Это позволяет получить информацию для ликвидации последствий чрезвычайной ситуации за более короткое время.*

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, математическая модель, вредные вещества, окружающая среда.

## METHOD MODELING OF DISTRIBUTION EMISSIONS

N.G. Kuchuk

*The method of modeling the propagation of emissions, which allows the simulation of a real-time with the constant refinement of the model on the basis of constantly entering the input data from various sensors. The difference from the existing model proposed is that it is relatively simple, suitable for practical purposes in real time, and also takes into account the most important factors which determine the dispersion of pollutants into the environment. This allows you to get information for emergency response in a shorter time.*

**Keywords:** emergency situation, a mathematical model, harmful substances, the environment.

Відмінність пропонуємої моделі від існуючих полягає в тому, що вона відносно проста, придатна для практичних розрахунків в режимі реального часу і також враховує найбільш істотні фактори, що визначають розсіювання забруднюючих речовин у навколишньому середовищі. Завдяки програмному комплексу, розробленому на основі даної моделі, можна отримати необхідну інформацію для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації за більш короткий час.

Подальші дослідження слід, в першу чергу, спрямувати на проведення статистичного аналізу дифузії домішок з метою оперативного уточнення короткочасного прогнозу розповсюдження шкідливих викидів.

## Список літератури

1. Биченок М.М. *Основи інформатизації управління регіональною безпекою* / М.М. Биченок. – К., 2005. – 196 с.
2. *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища у 2012 році* [Електронний ресурс]. – К., 2013. – Режим доступу до матеріалів доповіді: [http://www.mns.gov.ua/content/annual\\_report\\_2013.html](http://www.mns.gov.ua/content/annual_report_2013.html).
3. Kobayashi K. *Development of a computerized support system for emergency technical advisory body in Japan* / K. Kobayashi, T. Tobioka, K. Fujiki etc. // *Ibid.* – P. 348–351.
4. Горбачук В.М. *Аналіз критичних ситуацій техногенної природи, що призводять до аварій та катастроф у різних галузях господарської діяльності* : Препр. АН України. Ін-т кібернетики ім. В.М. Глушкова / В.М. Горбачук, Л.Г. Тарасов. – К.: 1993. – 28 с.
5. Качинський А.Б. *Безпека, загрози і ризик: наукові концепції та математичні методи* / А.Б. Качинський. – К.: ІПНБ, НАСБУ, 2004. – 472 с.
6. Семенчин Е.А. *Стохастические методы решения обратных задач в математической модели атмосферной диффузии* / Е.А. Семенчин, М.В. Кузякина / – М.: Физматлит, 2012. – 176 с.
7. Sun W.-Y. *Diffusion model for a convective layer. Part 2: Plume released from a continuous point source* / W.-Y. Sun, C.-Z. Chang // *J. Climate Appl. Meteorol.* – 1986. – Vol. 25, No 10. – P. 1454-1463.

Надійшла до редколегії 26.01.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співр. К.С. Козелкова, Державний університет телекомунікацій, Київ.