

*Азаров С.І., д-р техн. наук, ст. наук. співр., ІЯД НАНУ,  
Таранон Г.А., д-р техн. наук, проф., ІЯД НАНУ,  
Сидоренко В.Л., ст. викл., ІДУЦЗ УЦЗУ*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ВИКИДУ РАДІОАКТИВНОСТІ ПРИ АВАРІЇ ТА ПОЖЕЖІ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС**

(представлено д-ром фіз.-мат. наук Созніком О.П.)

Представлена фізико-математична модель розрахунків величини викиду радіоактивності та концентрації радіонуклідів у повітрі у ближній зоні у перші дні аварії на 4-му блоці ЧАЕС.

**Постановка проблеми.** Аварія на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС привела до катастрофічних наслідків і необхідності всебічного аналізу та уточнення причин, механізмів і обставин виникнення і розвитку аварійних процесів у просторі і часі. За офіційними даними [1] на момент аварії в активній зоні реактора РБМК-1000 перебувало близько  $5,6 \times 10^{19}$  Бк активності, з яких у процесі аварії у навколишнє середовище було викинуто  $4,4 \times 10^{18}$  Бк. Рівень радіоактивного забруднення поверхні землі у ближній зоні (5-30 км) склав, у середньому, для  $^{134}\text{Cs}$  –  $1,67 \times 10^5$  Бк/м<sup>2</sup>,  $^{137}\text{Cs}$  –  $6,67 \times 10^7$  Бк/м<sup>2</sup> і характеризувався великим розкидом по густині випадань. Це було викликано не тільки постійною зміною метеополів, але й, очевидно, складним характером тимчасового ходу викиду. Аналіз радіаційної аварії такого масштабу зажадав не тільки використання існуючих на той час моделей, але і розробки нових методів аналізу фізико-математичного моделювання виникнення та розвитку важких аварій.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Відомі роботи [2, 3] у яких для опису поширення радіоактивних викидів при аварії на 4-му енергоблоці ЧАЕС використалася масштабна модель, заснована на напівемпіричному рівнянні турбулентної дифузії. Однак дані моделі не дозволили описати початкову стадію розвитку аварії і випадання радіоактивних речовин у ближній зоні ЧАЕС, оскільки не враховували початкові параметри джерела аварії – тепловий вибух і горіння графіту.

**Постановка завдання та його вирішення.** У зв'язку з цим актуально є завдання дослідження динаміки викиду та осадження

радіонуклідів у навколишньому середовищі та уточнення фізико-хімічних процесів, що відбуваються у зруйнованому реакторі.

Джерело аварії (зруйнований 4-ий енергоблок) – лінійний, активністю  $A$  (Бк). Джерело у вигляді суми елементарних джерел з певними часом дії. Кожне елементарне джерело вважається постійним протягом інтервалу часу, які визначаються відповідно до наведеного аналізу стаціонарності метеоситуації. Допустимо, що відома функція  $f(x-x', y-y', z')$  – яка описує процеси просторового переносу радіоактивної домішки з точки джерела аварії  $x', y', z'$  у точку підстиляючої поверхні  $x, y$ . Тоді розподіл густини випадання цієї характеристики на підстиляючу поверхню  $q(x, y)$ , сформоване випаданням з об'ємного джерела аварії, буде визначатися інтегралами типу згортки по просторових координатах джерела і розміром часток

$$q(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x') c(x', y', z') \times f(x-x', y-y', z') dx' dy' dz', \quad (1)$$

де  $c(x', y', z')$  – концентрація радіонуклідної домішки.

Рівняння (1) являє собою інтегральне рівняння Фредгольма першого роду відносно невідомої функції  $A(x')$ .

Оскільки функція  $q(x, y)$  визначається за експериментальними даними, тобто задається з певною похибкою, то в математичному плані рішення рівняння (1) щодо невідомої функції  $A(x')$  є типовою некоректно поставленою задачею. Вихід з цього утруднення був запропонований Тихоновим (4). Сутність методу полягає в тому, що розглядається задача математичної статистики.

Апріорна інформація вводиться у вигляді відомого розподілу, імовірності  $A_j$ , або, інакше кажучи, шукається рішення системи рівнянь

$$\sum_{j=1}^n K_j A_j = q_j, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2)$$

де  $K_j$  – ядро інтегрального рівняння (1) – лінійний оператор.

Припустимо, що величина  $q_j$  вимірюється із середньоквадратичною помилкою  $\sigma_j$  незалежної при різних  $j$  і розподілена за нормальним законом. Тоді апріорна густина ймовірності, що характеризує процес, буде задаватися відношенням

$$P[q(x)] = \prod_{j=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j}} \exp \left\{ - \frac{\left( q_j - \sum_{i=1}^m K_{ji} A_i \right)^2}{2\sigma_j^2} \right\}. \quad (3)$$

В якості відновлювального джерела радіоактивності приймалося математичне очікування  $A$  за розподілом  $q$

$$P[A(q)] = C_1 \exp \left\{ - \frac{1}{2} (\hat{A}, [\hat{B} + \alpha \hat{\Omega}] \hat{A}) + (\hat{A} \hat{K}^T \hat{W} q) - \frac{1}{2} (\hat{A} \hat{W} \hat{q}) \right\}, \quad (4)$$

де  $C_1$  – константа не залежна від  $A$ ;  $\hat{K}_j$  – транспонована матриця;  $\hat{\Omega}$  – симетрична ненегативна визначена матриця порядку  $m \times m$ ;  $\alpha$  – параметр регуляризації.

Тут

$$\hat{W} = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_j}, & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}, \quad B = \hat{K}^T \times \hat{W} \times \hat{K}. \quad (5)$$

Апріорна густина ймовірності статистичного аналізу буде мати вигляд

$$P_\alpha[\hat{A}] = C_2 \alpha^{\binom{n-r}{2}} \exp \left\{ - \frac{\alpha}{2} (\hat{A}, \hat{\Omega} \hat{A}) \right\}, \quad (6)$$

де  $r$  – ступінь матриці  $\hat{\Omega}$ ;  $C_2$  – нормована стала.

Апостеріорний розподіл для активності  $A$  визначали з рівняння Бейеса

$$P(\hat{A}/\hat{q}, \alpha) = \frac{P(\hat{q}/\hat{A}) P_\alpha(\hat{A})}{\int \hat{P}(\hat{q}/\hat{A}) P_\alpha(\hat{A})}. \quad (7)$$

Використовуючи (4) і (6) знаходимо

$$P(\hat{A}/\hat{q}, \alpha) = C_3 \exp\left\{-\frac{1}{2}(\hat{A}, [\hat{B} + \alpha\hat{\Omega}]\hat{A}) + (\alpha \cdot \hat{A})\right\}, \quad (8)$$

де  $C_3$  – константа не залежна від  $\hat{A}$ .

Таким чином, отриманий нормальний розподіл для апостеріорної ймовірності  $P(\hat{A}/\hat{q}, \alpha)$  дає нам більш повне рішення задачі при заданій апіорі параметра регуляризації.

В якості відновленої функції  $\hat{A}$  було прийнято математичне очікування  $\hat{A}$  за розподілом (8)

$$(\hat{A})_\alpha = [\hat{B} + \alpha\hat{\Omega}]^{-1} \alpha \quad (9)$$

яка задовольняє рівнянню типу

$$\|\hat{K}\hat{A} - \hat{q}\| + \alpha\hat{\Omega}[\hat{A}] = \min, \quad (10)$$

де  $\hat{\Omega}[\hat{A}]$  – регулюючий функціонал, що приймає тим більше значення, чим менш гладка функція  $\hat{A}$ . Причому, помилка відновлення  $\hat{A}$  можна визначити за формулою

$$S_i = \sqrt{(A_i - (A_i)_\alpha)} = \sqrt{[(\hat{B} + \alpha\hat{\Omega})]_{ij}^{-2}}. \quad (11)$$

Відновлення аварійного викиду радіонуклідів у навколишнє середовище здійснювалося шляхом рішення зворотної задачі за формулами (1-11) за допомогою наявних експериментальних даних про густину радіоактивного забруднення у ближній зоні ЧАЕС з використанням апіорної інформації про найбільш імовірний дисперсний склад радіоактивної домішки у повітрі і про можливий вертикальний розподіл джерела аварії на висоті.

Вісь сліду дифузійно-гравітаційних випадань з точки джерела, розташованого по висоті  $z$ , формувалася у напрямку вітру, усередненого у знос атмосфери по поверхні землі до деякої ефективної висоти. Розсіювання домішки у вертикальному напрямку описувалося коефіцієнтом вертикальної дифузії, рівним середньому значенню цієї величини у шарі атмосфери.

Розсіювання домішки у горизонтальному напрямку описува-лося ефективним коефіцієнтом горизонтальної дифузії, що зале-жить від градієнта напрямку вітру по висоті атмосфери.

Профілі метеовеличин і характеристик турбулентності ви-значалися з рішення системи, що складається із стаціонарних од-номірних рівнянь руху, балансу кінетичної енергії турбулентності, рівняння для швидкості дисипації турбулентної енергії в просторі. Вираз для коефіцієнта турбулентності брався на підставі гіпотези наближеної подоби і напівемпіричного співвідношення для верти-кального градієнта потенційної температури.

Для розрахунку характеристик пограничного шару викорис-талася інформація про тиск і температуру на поверхні землі, а та-кож дані на ізобаричних поверхнях, представлених у вузлах регу-лярної сітки, а шорсткість землі – залежно від характеру підсти-люючої поверхні.

Порівняльний аналіз розрахованих даних за формулами (1-11) і з роботи [5] тимчасового ходу викиду активності протягом 10 днів аварії на ЧАЕС показав задовільний збіг (рис. 1). На графіку виникли доволі великі розбіжності на 2, 5, 6 та 7 днях. Це можна пояснити тим, що дані з роботи [5] можуть не у повній мірі відо-бражати реальні показники за цей період, так як вони склалися з двох замірів за добу і можуть мати доволі велику динамічну по-хибку.

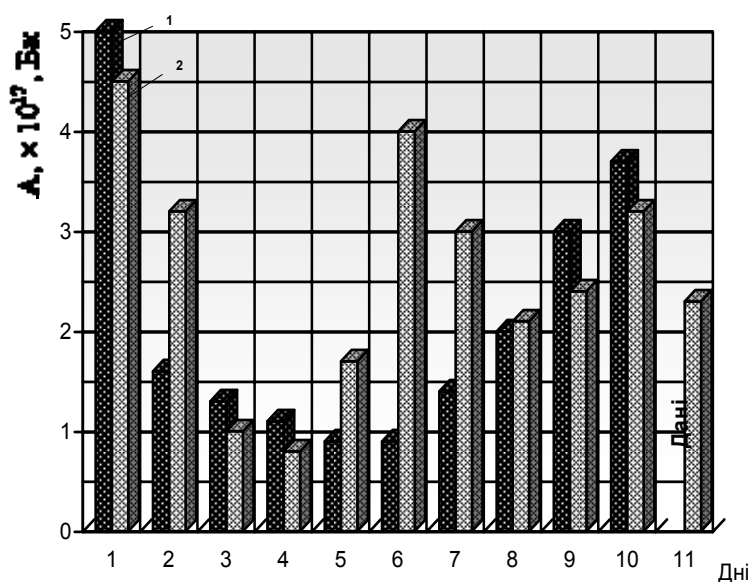


Рис. 1 – Активність викиду у перші дні аварії на ЧАЕС (1– за да-ними [5], 2 – за запропонованою моделлю)

Таку зміну сумарної активності радіонуклідів можна пояснити тим що у другій половині 27 квітня 1986 року мало місце горіння графіту і було суттєве підвищення температури у зруйнованому реакторі після його засипання з вертольотів з 4 травня 1986 року.

На рис. 2 представлені дані про концентрації радіонуклідів у повітрі при аварії на ЧАЕС, які отриманні різними способами за експериментальними даними [6]. Графік показує, що розрахунки за запропонованою моделлю доволі точно відображають реальні співвідношення викидів Sr-90/Cs-137 та Pu-238/Cs-137 із зруйнованого реактора.

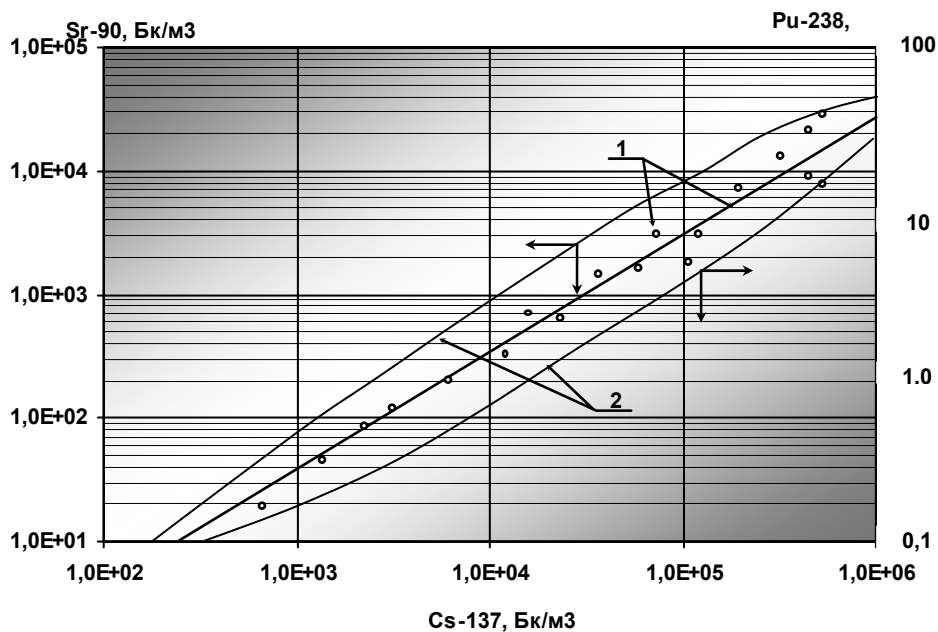


Рис. 2 – Концентрація радіонуклідів у повітрі (1 – за експериментальними даними, 2 – за запропонованою моделлю)

**Висновки.** Таким чином, представлена фізико-математична модель дозволяє розрахувати активність викидів при радіаційній аварії на 4-ом блоці ЧАЕС. Немонотонний характер дії джерела аварії є однією з причин складної картини радіоактивного випадання в ближній зоні ЧАЕС.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ // Атомная энергия, т. 61, вып. 5, 1986. – С. 301-320.

2. Израэль Ю.А., Петров В.Н., Саверов Д.А. Моделирование радиоактивных выпадений в ближней зоне от аварии на Чернобыльской АЭС // Метеорология и гидроскопия. № 7, 1987. – С. 5-13.
3. Радиоактивное загрязнение природных сред в зоне аварии на Чернобыльской АЭС (Ю.А. Израэль) // Метеорология и гидроскопия. № 2, 1987. – С. 5-18.
4. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. – 287 с.
5. Чернобыльская катастрофа. Под ред. В.Г. Барьяхтара. – К.: Наукова думка, 1995. – 560 с.
6. Радиоэкологические последствия Чернобыльской аварии. – М.: 1991. – 201 с.

## УДК 693.52

*Баранов А.Н., д-р техн. наук, проф., УИПА,  
Морозов А.И., нач. отдела, УГЗУ*

### **ПОВЫШЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПОМОЛЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В МЕЛЬНИЦАХ БАРАБАННОГО ТИПА**

(представлено д-ром техн. наук Абрамовым Ю.А.)

Разработаны методы повышения взрывобезопасности при помоле твердого топлива в мельницах барабанного типа на базе исключения взрывоопасной концентрации угольной пыли. Обоснована необходимость контроля гранулометрии угля подаваемого на помол и соответствующей настройки сепараторов при помоле в замкнутом цикле

**Постановка проблемы.** Рост мощностей электростанций и других производств, работающих на органическом топливе, выдвигает все более строгие требования к надежности, безопасности и экономичности эксплуатации оборудования. Поэтому непрерывно продолжаются поиски новых принципов их работы. Это особенно характерно для производств, на которых применяется твердое топливо.

Несмотря на значительные достижения в технике пылеприготовления и сжигания топливной пыли, число взрывов в пылесис-