

3. *Правила* користування системами комунального водопостачання та водоведення в містах і селищах України. – К., 1994. – 168 с.
4. Лобачев Л.В., Шевелев Ф.А. Измерение расхода жидкостей и газов в системах водоснабжения и канализации. – М.: Стройиздат, 1985. – 424 с.
5. Пат. 30051А UA, МПК 6 G01P 5/08. Спосіб електричного вимірювання швидкості потоку рідини / Б.В. Смирнитський, М.Б. Смирнитська (Україна). – №97125978; Заявлено 10.12.97; Опубл. 15.11.2000, Бюл. № 6-П. – 10 с.

Стаття надійшла до редакції 15.10.02.

2470-082.03 + Б1 + P126.3 + 240MG1 + 2460-082.03
УДК 504.75.054:621.311.25(045)

очат зараження радіоактивний
аварія реактора атомного
ЧАЕС, катастрофа ядерна
контроль радіоекологічний
Аварія електростанції
контроль санітарно-дозиметрич

Б.Т. Канунніков, асист.

(Національний авіаційний університет)

В.А. Лук'янчиков, асп.

(Національний авіаційний університет)

В.І. Применко, д-р техн. наук, проф.

(Національний авіаційний університет)

МОДЕЛЮВАННЯ ОСЕРЕДКУ РАДІОАКТИВНОГО ЗАРАЖЕННЯ ПРИ АВАРІЇ НА АТОМНОМУ РЕАКТОРІ

Розглянуто моделі формування осередку радіоактивного зараження. Вибрано оптимальну геометричну форму радіаційного осередку. Запропоновано методику розрахунку його глибини. Визначено характеристики радіаційного зараження як функції віддалі і часу.

При великих катастрофах на атомних електростанціях (АЕС) або сховищах радіоактивних відходів осередку радіоактивного зараження займають значні площі поверхні землі, що обчислюються сотнями квадратних кілометрів. Осередок зараження умовно поділяється на частини – зони радіоактивного зараження. У разі глобальної катастрофи на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) було виділено чотири зони.

Перша зона – відчуження – характеризується питомою активністю (А) цезію-137, що перевищує $1,7 \text{ МБк/м}^2$.

Друга зона – обов'язкового відселення – має забрудненість за цезієм-137 $0,56\text{--}1,7 \text{ МБк/м}^2$.

Третя зона – добровільного відселення – характеризується активністю цезію-137 у межах $0,19\text{--}0,56 \text{ МБк/м}^2$.

Четверта зона – посиленого радіоекологічного контролю – має активність цезію-137 у межах $0,037\text{--}0,19 \text{ МБк/м}^2$.

Така класифікація осередку зараження здійснена, насамперед, за біологічною ознакою як характеристика рівня небезпеки для проживання людей в тій чи іншій зоні [1].

У зоні відчуження додаткова річна еквівалентна доза опромінення H_T значно перевищує $0,1 \text{ Зв}$, що небезпечно для життя людини.

У зоні обов'язкового відселення вказана доза становитиме не менше $0,1 \text{ Зв}$, що теж небезпечно для життя людини.

У зоні добровільного відселення додаткова річна еквівалентна доза опромінення може перевищувати 5 мЗв , що загрожує здоров'ю людини.

У зоні посиленого радіоекологічного контролю проживати можна, але за умови, що додаткова річна еквівалентна доза опромінення не перевищує 1 мЗв .

Отже, закон, що відповідає за рівнем вимог до радіаційного забруднення найбільш розвинутих країнам світу, встановлює межею осередку зараження площі, де додаткова річна еквівалентна доза опромінення не перевищує 1 мЗв [1]. Саме тому ця величина взята нами як критерій під час моделювання осередку радіоактивного зараження. При цьому в основу покладено якісний взаємозв'язок між активністю радіонуклідів, що забруднюють територію, і віддаллю від зруйнованого реактора: чим більша ця віддаль, тим нижче активність радіонуклідів. Мінімальною вона є на межі осередку зараження.

Уведений нами критерій дозволяє кількісно розрахувати відповідну активність радіонуклідів. При цьому використовується рівняння

$$H_T = 2\dot{H}_{T_1}(t_{\text{вих}}^{0,5} - t_{\text{вх}}^{0,5}), \quad (1)$$

де H_T – річна еквівалентна доза опромінення (у нашому випадку 1 мЗв); \dot{H}_{T_1} – потужність еквівалентної дози на 1 год після катастрофи на реакторі на межі осередку радіоактивного забруднення; $t_{\text{вих}} = 24 \cdot 365 = 8760$ год – час виходу з осередку зараження (через рік); $t_{\text{вх}} = 1$ год – час входження в осередок зараження.

Вирішуємо рівняння (1) відносно потужності еквівалентної дози \dot{H}_{T_1} :

$$\dot{H}_{T_1} = \frac{H_T}{2(t_{\text{вих}}^{0,5} - t_{\text{вх}}^{0,5})} = \frac{H_T}{185}.$$

Оскільки для межі осередку зараження $H_T = 1$ мЗв рівноцінна поглинутій дозі $D = 1$ мГр (у випадку гамма-опромінення), то

$$\dot{D}_1 = D/185 = 1 \text{ мГр}/185 = 0,0054 \text{ мГр}/\text{год}.$$

Далі знаходимо взаємозв'язок між рівнем радіації й активністю радіонуклідів, тобто вирішуємо рівняння

$$\dot{X} = f(A), \quad (2)$$

де A – питома активність радіонуклідів, Бк/м².

Для випадку ядерного вибуху, де ядерна реакція йде практично миттєво, залежність (2) між \dot{X} і A є константою [2]. Постійний взаємозв'язок між \dot{X} і A при цьому моделюється на основі того, що якісний склад радіонуклідів практично не змінюється при зміні потужності заряду, а змінюється лише відповідно концентрація радіонуклідів. Указана конкретність повністю відсутня у випадку аварії на ядерному реакторі, адже якісний склад радіонуклідів, що покидатимуть реактор, залежатиме від проміжку часу, який минув із моменту завантаження палива в реактор, типу реактора. І чим більший цей проміжок часу, тим менше у викиді з реактора буде короткоіснуючих радіонуклідів і тим більше довгоіснуючих радіонуклідів. Це означає, що залежність $\dot{X} = f(A)$ для випадку аварії на АЕС не може бути універсальною і має лише частковий розв'язок.

Так, для випадку катастрофи на ЧАЕС якісний склад і активність радіонуклідів викиду може бути охарактеризовано даними, наведеними в табл. 1 і 2.

Розподіл радіонуклідів у зонах зараження зумовив певний ступінь ризику проживання людини. При цьому контролюється [1] активність основних альфа-, бета-, гамма-випромінювачів: плутонію-239, стронцію-90 і цезію-137. Оскільки їх концентрація в зонах зараження змінюється індивідуально, слід чекати різних кількісних характеристик зв'язку між \dot{X} і A для різних зон зараження. Це підтверджується результатами вимірювань, наведеними в роботі [3], де автор дає залежність між рівнем радіації і активністю радіонуклідів у широкому діапазоні (табл. 3). Якщо дані табл. 3 описати рівнянням $A = K \cdot \dot{X}$, то для четвертої зони $K=10$, третьої зони – $K=8$, другої зони – $K=6$, першої зони – $K=3$.

Оскільки практичні завдання, пов'язані з перебуванням населення, найбільш актуальні для четвертої, третьої та другої зон зараження, можна вивести усереднений коефіцієнт пропорційності: $K=8$. У цьому випадку $A = 8 \cdot \dot{X}$.

Розраховані коефіцієнти пропорційності між \dot{X} і A практично не змінюватимуться з часом. Це впливає з того, що співвідношення між активністю альфа-, бета-, гамма-випромінювачів з часом практично не змінюється (табл. 4). Отже, для випадку катастрофи на ЧАЕС питома активність радіонуклідів на 1 год після аварії на межі осередку зараження може бути розрахована за рівнянням

$$A_1 = K \cdot \dot{X}_1 = 10 \dot{X}_1,$$

тоді $A_1 = 0,2$ МБк/м² – це мінімальна активність ґрунту, що відповідає осередку радіоактивного зараження, коли додаткова річна еквівалентна доза зараження дорівнюватиме 1 мЗв.

Таблиця 1

**Активність радіонуклідів після викиду з аварійного реактора ЧАЕС
через 1–2 рр. після аварії**

| Радіонуклід | Період піврозпаду | Активність радіонуклідів | | | | | |
|--------------|-------------------|--------------------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| | | після викиду | | через 1 р. | | через 2 р. | |
| | | ПБк | % | ПБк | % | ПБк | % |
| Стронцій-89 | 50,5 д. | 81,4 | 6,30 | 0,888 | 0,67 | 0,01 | 0,01 |
| Стронцій-90 | 28,5 р. | 8,14 | 0,63 | 7,96 | 6,00 | 7,77 | 9,41 |
| Цирконій-95 | 64,0 д. | 29,6 | 10,85 | 2,74 | 2,10 | 0,04 | 0,06 |
| Молібден-99 | 66,0 год | 111,0 | 8,67 | - | - | - | - |
| Рутеній-103 | 39,4 д. | 118,4 | 9,14 | 0,21 | 0,156 | 0,0003 | - |
| Рутеній-106 | 368,2 д. | 59,2 | 4,57 | 29,6 | 22,22 | 3,7 | 17,90 |
| Йод-131 | 8,1 д. | 270,1 | 20,85 | - | - | - | - |
| Телур-132 | 77,7 год | 48,1 | 3,7 | - | - | - | - |
| Цезій-134 | 2,1 р. | 18,5 | 1,4 | 13,32 | 10,0 | 9,62 | 11,66 |
| Цезій-137 | 30,2 р. | 37,0 | 2,8 | 36,19 | 27,16 | 35,34 | 42,83 |
| Барій-140 | 12,8 д. | 159,1 | 12,3 | - | - | - | - |
| Церій-141 | 32,5 д. | 103,6 | 8,0 | 0,044 | 0,03 | 0,0001 | - |
| Церій-144 | 285 д. | 88,8 | 6,84 | 37,0 | 27,76 | 10,10 | 12,24 |
| Нептуній-239 | 2,4 д. | 44,4 | 3,42 | - | - | - | - |
| Плутоній-239 | 24400 р. | 0,09 | 0,07 | 0,09 | 0,07 | 0,096 | 0,11 |
| Плутоній-241 | 15,16 р. | 5,18 | 0,4 | 4,96 | 3,71 | 4,736 | 5,74 |
| Кюрій-242 | 162,8 д. | 0,777 | 0,06 | 0,17 | 0,12 | 0,035 | 0,04 |
| Разом | - | 1295,0 | 100,0 | 1333,496 | 100,0 | 82,55 | 100 |

Таблиця 2

**Активність радіонуклідів після викиду з аварійного реактора ЧАЕС
через 3–10 рр. після аварії**

| Радіонуклід | Період піврозпаду | Активність радіонуклідів | | | | | |
|--------------|-------------------|--------------------------|-------|------------|-------|-------------|-------|
| | | через 3 р. | | через 5 р. | | через 10 р. | |
| | | ПБк | % | ПБк | % | ПБк | % |
| Стронцій-89 | 50,5 д. | - | - | - | - | - | - |
| Стронцій-90 | 28,5 р. | 7,585 | 11,26 | 7,215 | 14,1 | 6,394 | 16,0 |
| Цирконій-95 | 64,0 д. | 0,001 | - | - | - | - | - |
| Молібден-99 | 66,0 год | - | - | - | - | - | - |
| Рутеній-103 | 39,4 д. | - | - | - | - | - | - |
| Рутеній-106 | 368,2 д. | 7,40 | 11,00 | 1,850 | 3,62 | 0,058 | 0,14 |
| Йод-131 | 8,1 д. | - | - | - | - | - | - |
| Телур-132 | 77,7 год | - | - | - | - | - | - |
| Цезій-134 | 2,1 р. | 6,88 | 10,22 | 3,663 | 7,17 | 0,699 | 1,75 |
| Цезій-137 | 30,2 р. | 34,558 | 51,32 | 32,967 | 64,57 | 29,434 | 73,65 |
| Барій-140 | 12,8 д. | - | - | - | - | - | - |
| Церій-141 | 32,5 д. | - | - | - | - | - | - |
| Церій-144 | 285 д. | 6,290 | 9,35 | 1,073 | 2,1 | 0,013 | 0,03 |
| Нептуній-239 | 2,4 д. | - | - | - | - | - | - |
| Плутоній-239 | 24400 р. | 0,093 | 0,14 | 0,093 | 0,18 | 0,093 | 0,23 |
| Плутоній-241 | 15,16 р. | 4,514 | 6,70 | 42,180 | 8,26 | 3,282 | 8,20 |
| Кюрій-242 | 162,8 д. | 0,007 | 0,01 | 0,00034 | - | - | - |
| Разом | - | 67,34 | 100,0 | 51,06 | 100,0 | 39,96 | 100 |

Залежність між рівнем радіації та активністю радіонуклідів

Таблиця 3

| Рівень радіації \dot{X}_1 Кл/Кг · год | Активність радіонуклідів A , МБк/м ² | Рівень радіації \dot{X}_1 Кл/Кг · год | Активність радіонуклідів A , МБк/м ² |
|--|---|--|---|
| $2,6 \cdot 10^{-9}$ | 0,0037 | $26 \cdot 10^{-7}$ | 2,22 |
| $2,6 \cdot 10^{-8}$ | 0,037 | $52 \cdot 10^{-7}$ | 2,96 |
| $2,6 \cdot 10^{-7}$ | 0,296 | $78 \cdot 10^{-7}$ | 3,70 |
| $5,2 \cdot 10^{-7}$ | 0,555 | $130 \cdot 10^{-7}$ | 5,55 |
| $13,0 \cdot 10^{-7}$ | — | 1,480 | 9,62 |

Геометрично осередок радіоактивного зараження може бути зображений у вигляді сектора круга, у центрі якого знаходиться зруйнований реактор. При цьому сектор із кутом 40 град гарантовано містить усі заражені території. Про це свідчить досвід випробувань ядерної зброї, адже і в цьому випадку осередок зараження вміщується в сектор із кутом 40 град. Пилова радіоактивна хмара піднімається на висоту 10–15 км, тоді як у випадку катастрофи на АЕС – на висоту 2,5–3 км, тобто сектор розпилення тут вужчий.

В осередку зараження (сектори круга з кутом 40 град) безпосередньо біля зруйнованого реактора виділяємо невелику зону (менше ніж 1% від загальної площі осередку зараження). Активність радіонуклідів у цій зоні буде максимальною. У міру віддалення від неї відбувається все більший спад активності – до 199,8 кБк/м² на межі осередку зараження. Виділена зона відіграватиме роль реперної точки на шкалі, що характеризує зміну активності з віддаллю. При цьому можна використовувати рівняння типу:

$$A_L = A_1 L^n,$$

де A_L – питома активність на віддалі L кілометрів від зруйнованого реактора; A_1 – питома активність у виділеній біля реактора однокілометровій зоні; n – показник ступені рівняння.

Для практичного використання наведеного рівняння слід встановлювати залежність питомої активності радіонуклідів у виділеній зоні від активності викиду із зруйнованого реактора, тобто

$$A_1 = f(N_{\text{зар}}).$$

Крім того, слід установити числове значення показника n . Оскільки при прийнятих умовах моделювання осередку радіоактивного зараження глибина його становитиме кілька сот кілометрів, глибина виділеної зони біля реактора дорівнює 1 км, тобто A_1 – це питома активність радіонуклідів на поверхні ґрунту на відстані 1 км від зруйнованого реактора на 1 год після аварії.

У разі конкретних розрахунків параметри радіоактивного розпаду слід характеризувати не тільки віддаллю від зруйнованого реактора, але й часом від моменту аварії. Наприклад, A_{1-1} – питома активність ґрунту на 1 год після аварії в однокілометровій зоні.

Отже, можна одночасно характеризувати стан радіаційного забруднення за двома основними параметрами.

Список літератури

1. Закон України від 27.02.1991 р. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи. – К.: ВВРУ, 1991.
2. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 352 с.
3. Авсеенко В.Ф. Дозиметрические и радиометрические приборы и измерения. – К.: Урожай, 1990. – 239 с.

Стаття надійшла до редакції 18.11.02.

Таблиця 4

Співвідношення між активністю альфа-, бета-, гамма-випромінювачів четвертої зони

| Випромінювач | Рік | |
|--------------------|-------|-------|
| | 1986 | 2016 |
| Альфа-випромінювач | 96,90 | 96,72 |
| Бета-випромінювач | 2,90 | 2,89 |
| Гамма-випромінювач | 0,20 | 0,39 |