

УДК 504.75.054:621.311.25(45)

<sup>1</sup>В.І. Применко, д-р тех. наук<sup>2</sup>Б.Т. Канунніков<sup>3</sup>О.П. Жижченко<sup>4</sup>В.А. Лук'янчиков**РОЗРАХУНОК СПАДУ АКТИВНОСТІ РАДІОНУКЛІДІВ ЯК ФУНКЦІЇ ВІДДАЛІ**<sup>1,2,3</sup>Інститут транспортних технологій, НАУ, e-mail: itt@nau.edu.ua; www.nau.edu.ua<sup>4</sup>Дочірня компанія "Газ України", e-mail: wluk@ukr.net

*Виведено рівняння розрахунку спаду рівня радіації та активності радіонуклідів як функції віддалі від зруйнованого атомного реактора. Уведено поняття однокілометрової зони – території, від якої відраховується спад параметрів радіоактивності.*

**Вступ**

Зараз рівень радіації та активність радіонуклідів характеризують як функцію часу [1; 2]. Адже зі збільшенням часу радіоактивного зараження території внаслідок розпаду радіонуклідів концентрація їх зменшується, що призводить до спаду активності та рівня радіації. При цьому встановлені функціональні залежності між наведеними величинами [1]. Однак рівень радіації та активність радіонуклідів залежить також від віддалі до зруйнованого реактора. Адже первісна радіоактивна хмара активно "висіває" радіоактивні частини саме на перших кілометрах свого шляху, а надалі інтенсивність цього процесу зменшується. Встановленню аналітичної залежності, що характеризує цей процес, присвячена дана стаття.

**Постановка задачі**

В статті розглянуто методику оперативної оцінки "Радіаційної ситуації на місцевості, як функції загальної активності викиду з реактора та особливостей вітрової обстановки. З метою наближення розрахункової моделі до реальності встановлено функціональний зв'язок між спадом активності радіонуклідів і віддаллю від зруйнованого реактора.

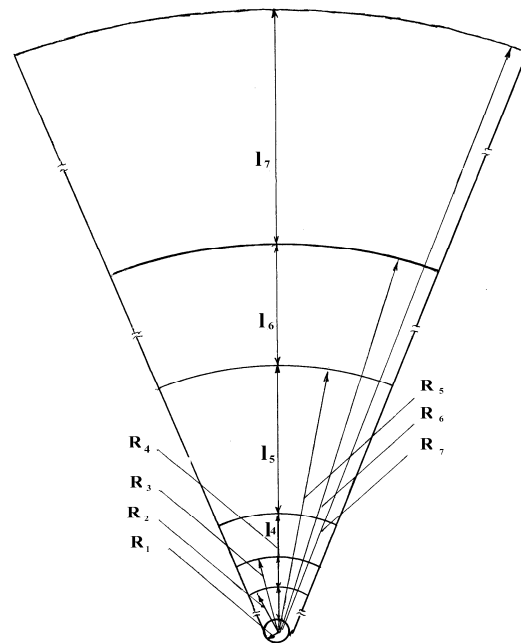
Згідно з даними [1; 2] про зараження території внаслідок повного радіоактивного викиду на атомній електростанції з реактора типу РВПК потужністю 1000 МВт концентрація радіонуклідів на поверхні землі відповідатиме річними дозами опромінення, наведеним у таблиці.

**Додаткові еквівалентні дози опромінення і відповідні їм площі в осередку радіоактивного зараження**

Річна еквівалентна доза опромінення, $H_T$ , зв	Площа зараження $S$ , км <sup>2</sup>
1,0	50
0,5	100
0,1	500
0,02	2300
0,002	20000
0,001	35000

У таблиці два останні значення еквівалентних доз і відповідних їм площ території одержані шляхом лінійної екстраполяції. Це необхідно для визначення межі зони радіаційного забруднення, що відповідає закону України [3].

Наведені дані використані для моделювання осередку радіоактивного зараження (див. рисунок).



Осередок радіоактивного зараження місцевості внаслідок аварії на атомному реакторі:

$R_1 - R_7$  – віддалі від місця аварії до зовнішнього кордону зон;  $l_1 - l_7$  – розміри зон зараження

Згідно з працею [4] осередок радіоактивного зараження являє собою сектор з кутом 40°, що розташований симетрично відносно осі вітру.

Віддаль від місця аварії (реактора) до зовнішньої межі осередку зараження позначаємо як  $R_7$ . Протяжність першої зони осередку зараження беремо 1 км від місця аварії, а щільність зараження, враховуючи незначну (0,35 км<sup>2</sup>) площу цієї зони, – постійною на всій її протяжності.

В інших зонах щільність зараження зменшується з ростом віддалі від місця аварії. Згідно з даними таблиці довжину відповідних зон (див. рисунок) можна записати так:

$$\begin{aligned} l_1 &= R_1 = 1 \text{ км}; \\ l_2 &= R_2 - R_1; \\ l_3 &= R_3 - R_2; \\ l_4 &= R_4 - R_3; \\ l_5 &= R_5 - R_4; \\ l_6 &= R_6 - R_5; \\ l_7 &= R_7 - R_6. \end{aligned}$$

Оскільки кут сектора зараження становить  $40^\circ$  то його площу  $S$  можна описати рівнянням:

$$S' = \pi R^2 \frac{40^\circ}{360^\circ} = \frac{\pi R^2}{9}. \quad (1)$$

Розв'язуючи рівняння (1) відносно  $R$  одержимо:

$$R^2 = \frac{9S}{\pi},$$

тоді

$$R = \sqrt{\frac{9}{\pi} S} = 1,693\sqrt{S}. \quad (2)$$

Використовуючи рівняння (2), можна розрахувати віддаль від місця аварії до зовнішньої межі кожної зони:

$$\begin{aligned} R_1 &= 1 \text{ км}; R_2 = 1,693\sqrt{50} = 11,97 \approx 12 \text{ км}; \\ R_3 &= 1,693\sqrt{50+100} = 20,74 \approx 21 \text{ км}; \\ R_4 &= 1,693\sqrt{50+100+500} = 43,17 \approx 43 \text{ км}; \\ R_5 &= 1,693\sqrt{2950} = 91,95 \approx 92 \text{ км}; \\ R_6 &= 1,693\sqrt{22950} = 256,49 \approx 256 \text{ км}; \\ R_7 &= 1,693\sqrt{57950} = 407,51 \approx 408 \text{ км}. \end{aligned}$$

### Залежність потужності опромінення дози від віддалі

Знаючи дози опромінення на межах зон протягом року (див. таблицю), можна визначити потужності еквівалентних доз опромінення для них на 1 год після аварії згідно з формулою:

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

звідси

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

Якщо час входу в зону зараження

$$t_{\text{вх}} = 1 \text{ год},$$

час виходу з зони зараження

$$t_{\text{вих}} = 8760 \text{ год (1 рік)},$$

то одержимо:

$$\dot{H}_{T_1} = \frac{H_{T_1}}{185}.$$

Отже, на межах зон (див. рисунок) потужності еквівалентних доз мають відповідно до річних доз такі значення:

$$H_{T_2} = 1000 \text{ мЗв};$$

$$H_{T_3} = 500 \text{ мЗв};$$

$$H_{T_4} = 100 \text{ мЗв};$$

$$H_{T_5} = 20 \text{ мЗв};$$

$$H_{T_6} = 2 \text{ мЗв};$$

$$H_{T_7} = 1 \text{ мЗв};$$

$$R_2 = 12 \text{ км};$$

$$R_3 = 21 \text{ км};$$

$$R_4 = 43 \text{ км};$$

$$R_5 = 92 \text{ км};$$

$$R_6 = 256 \text{ км};$$

$$R_7 = 408 \text{ км};$$

$$\dot{H}_{T_{1-12}} = 540 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1};$$

$$\dot{H}_{T_{1-21}} = 270 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1};$$

$$\dot{H}_{T_{1-43}} = 54 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1};$$

$$\dot{H}_{T_{1-92}} = 10,8 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1};$$

$$\dot{H}_{T_{1-256}} = 1,08 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1};$$

$$\dot{H}_{T_{1-408}} = 0,54 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}.$$

Знаючи потужності еквівалентних доз на різних віддальях від місця аварії можна визначити взаємозв'язок між потужністю еквівалентної дози опромінення і віддаллю в загальному вигляді:

$$\dot{H}_{T_{1-l}} R_l^n = \text{const},$$

тоді:

$$\dot{H}_{T_{1-12}} R_2^n = \dot{H}_{T_{1-21}} R_3^n = \dot{H}_{T_{1-43}} R_4^n =$$

$$= \dot{H}_{T_{1-92}} R_5^n = \dot{H}_{T_{1-256}} R_6^n = \dot{H}_{T_{1-408}} R_7^n$$

Оскільки показник ступеня

$$n = \frac{\lg \dot{H}_{T_{1-12}} - \lg \dot{H}_{T_{1-21}}}{\lg R_3 - \lg R_2},$$

то розрахувавши всі 15 можливих значень  $n$  відповідно до кожної пари значень:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^{15} n_i}{15}; \quad n = 1,985,$$

округляємо його значення до двох, тобто  $n=2$ .

Тоді рівняння взаємозв'язку між потужністю еквівалентної дози опромінення і віддаллю в загальному вигляді може бути подано так:

$$\dot{H}_{T_{1-l}} R_l^2 = \text{const},$$

звідси:

$$\dot{H}_{T^{1-l}} = \dot{H}_{T^{1-l}} l^{-2}.$$

Значення потужності еквівалентної дози опромінення може бути розраховане зі співвідношення:

$$\begin{aligned} \dot{H}_{T^{1-1}} R_1^2 &= \dot{H}_{T^{1-2}} R_2^2 = \dot{H}_{T^{1-21}} R_3^2 = \\ &= \dot{H}_{T^{1-43}} R_4^2 = \dot{H}_{T^{1-92}} R_5^2 = \dot{H}_{T^{1-256}} R_6^2 = \\ &= \dot{H}_{T^{1-408}} R_7^2. \end{aligned}$$

При цьому середнє значення потужності дози опромінення із семи розрахованих становить:

$$\dot{H}_{T_{cp}} = 900 \text{ мЗв} \cdot \text{год}^{-1}$$

### Взаємозв'язок між активністю радіонуклідів і віддаллю від зруйнованого реактора

На основі взаємозв'язку потужності еквівалентної дози опромінення і віддаллю можна вивести рівняння, що пов'язує зміну активності радіонуклідів з віддаллю від зруйнованого реактора.

Запишемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{H}_T^{1-l} = \dot{H}_T^{1-l} l^{-2}; \\ A_{1-l} = k \dot{H}_T^{1-l}, \end{cases}$$

де  $A_{1-l}$  – питома активність радіонуклідів на віддалі  $l$  на 1 год після зараження, тоді

$$A_{1-l} = k \dot{H}_T^{1-l} = k \dot{H}_T^{1-l} l^{-2},$$

однак

$$\dot{H}_T^{1-l} = \frac{A_{1-l}}{k},$$

а значить,

$$A_{1-l} = k \dot{H}_T^{1-l} l^{-2} = \frac{k A_{1-l} l^{-2}}{k},$$

тобто

$$A_{1-l} = A_{1-l} l^{-2}. \quad (3)$$

Практичне використання рівняння (3) потребує знання величини  $A_{1-l}$ . Перше значення її може бути розраховане для повного викиду активності з реактора РВПК-1000 ( $74 \cdot 10^6$  ТБк) [2]. При цьому абсолютна активність осередку зараження  $N_{зар}$  становитиме 0,5% від абсолютної активності викиду  $N_{вик}$  [2], тобто  $N_{зар} = 37 \cdot 10^4$  ТБк.

Для цього випадку  $R_7 = 408$  км, а щільність забруднення  $A_{1-408}$  становитиме  $19,98 \cdot 10^8$  ТБк·м<sup>2</sup>.

Використовуючи рівняння

$$A_{1-l} = A_{1-l} l^{-2}$$

знайдемо, що

$$A_{1-l} = 33,26 \cdot 10^{-3} \text{ ТБк} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Оскільки площа однокілометрової зони зараження становить  $0,35 \text{ км}^2$ , абсолютна активність радіонуклідів на ній дорівнює  $11\,640,8$  ТБк, або 3,15% від  $N_{зар}$ . Оскільки  $N_{зар} = 0,5\%$  від  $N_{вик}$  [2], можна записати:

$$\begin{aligned} A_{1-l} &= \frac{N_{вик}}{200} \frac{3,15}{100} \frac{1}{0,35 \cdot 10^6} = \\ &= \frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{10^6} N_{вик} = 4,5 \cdot 10^{-10} N_{вик}. \end{aligned} \quad (4)$$

Одержане рівняння (4) дозволяє моделювати етап активності радіонуклідів як функцію віддалі від зруйнованого реактора.

Наведена методика розрахунку спаду рівня радіації спрацьовує для одиничного викиду за умови статичної вітрової ситуації та відсутності додаток викидів. Якщо ж вітрова обстановка нестабільна або відбуваються додаткові викиди, то слід уносити поправки на ці явища.

Нестабільність призводить до суттєвого розсіяння радіонуклідів на незаплановані території, а додатковий викид до інтенсивного випадіння радіонуклідів. Саме такі явища відбувалися при викиді радіонуклідів із четвертого реактора Чорнобильської атомної станції, а також ціла серія викидів з 27 квітня 1986 р. по 6 травня 1986 р. Унаслідок цього були забруднені території, що розташовані як на південь і північ, так і на захід і схід від зруйнованого реактора. При цьому деякі зони земель зазнавали повторних радіаційних забруднень від екстремальних викидів унаслідок дії зазначених факторів.

Усе це призвело до певної зовнішньої непослідовності в забрудненні території, що зафіксували численні фотознімки з космічних апаратів. Однак аналіз цих даних з урахуванням повторного радіаційного забруднення місцевості та специфічних кліматичних умов дає можливість вірно розрахувати рівень радіаційного забруднення.

Отже, запропонована методика розрахунку спаду рівня радіації як функції віддалі від зруйнованого реактора може стати основою експресного методу аналізу стану радіоактивного забруднення території. Ці розрахунки можуть бути проведені кожним підприємством, якщо відома активність викиду, що дозволить своєчасно провести адекватні профілактичні заходи і тим самим мінімізувати небезпеку.

Але з часом на поверхні радіоактивного забруднення місцевості відбуваються еволюційні зміни, які пов'язані, перш за все, зі специфікою чорнобильського викиду. Адже на зруйнованому блоці горіли графітові стрижні, що викликало різке підвищення температури. У цих умовах утворювались оксиди і карбіди ряду радіонуклідів. Вони погано розчиняються у воді, бо є хімічно інертними. Тому їх міграція в природних умовах є обмеженою і зводиться, переважно, до розповсюдження з пилом.

Разом з тим, дослідження показали значне зменшення активності цезію-137 у ґрунті. Це пов'язано не тільки з природним розпадом його згідно з експоненціальним законом

$$P_t = P_2 t^{-0.5},$$

а й із міграцією даного гамма-випромінювача у ґрунті за рахунок переміщення вільних іонів або комплексів їх з органічною речовиною в результаті дифузії. Це пов'язано з хімічною природою даного радіонукліда, еквівалентного за хімічними властивостям натрію і калію, більшість солей яких і, зокрема, карбонати добре розчиняються у воді. Створення карбонатів у міській зоні є більш вірогідним у зв'язку з підвищеним вмістом у повітрі вуглекислого газу. Помітні спади інтенсивності гамма-випромінювання зафіксовані нами на поверхні ґрунту в зимові місяці, коли спостерігались опади у вигляді дощу, який фільтрувався ґрунтом.

Однак альфа-активність на поверхні ґрунту залишалася протягом декількох років практично незмінною. Це свідчить про те, що на міграцію альфа-випромінювачів суттєвого впливу не здійснюють як вітровий переніс, так і дифузія та конвекція їх у ґрунті.

Подібно поведуть себе в ґрунті бета-випромінювачі. Це пов'язано, передусім, із хімічною природою стронцію-90, ряд солей якого, зокрема, карбонати слабо розчиняються у воді.

Ґрунтовий покрив є основним місцем зберігання довгоживучих радіонуклідів, які знаходяться там найбільший час у порівнянні з іншими ланками екологічного ланцюга.

Отже, еволюційні процеси в навколишньому середовищі можуть призвести до відхилень у розрахунках рівнів радіоактивного забруднення територій, однак практично завжди – у сторону їх послаблення. У результаті цього розрахунки і в цьому випадку дають змогу оцінити максимальну небезпеку забруднення за найбільш несприятливих умов еволюційних процесів.

### Висновки

У запропонованій реальній моделі розрахунку спаду радіації на місцевості враховується не тільки залежність рівня радіації від часу, але й залежність його від віддалі до осередку катастрофи. Таким чином, рівень радіації  $P$  слід характеризувати не тільки як функцію часу  $P_t$ , а як комбіновану функцію часу та віддалі  $P_{t,l}$ . Це зробить розрахунки станів зараження місцевості більш надійними і забезпечить оптимальні дії на зараженій території.

### Список літератури

1. *Іванов Б.Б., Наумов Н.Ф., Пастухов В.К., Применко В.И.* Радиационная и химическая безопасность на воздушном транспорте: Текст лекций. – К.: КИИГА, 1993. – 39 с.
2. *Мясников В.В.* Защита от оружия массового поражения. – М.: Воениздат, 1989. – 398 с.
3. *ВРУ.* Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок чорнобильської катастрофи: Закон України від 27.02.1991 р. // ВВРУ. – 1991. № 16. – 199 с.
4. *Канунников Б.Т., Лук'янчиков В.А., Применко В.И.* Моделирование осередку радиоактивного заражения при аварии на атомном реакторе // Вісн. НАУ. – 2002. – №4. – С.176–189.

Стаття надійшла до редакції 19.03.04

В.И. Применко, Б.Т. Канунников, А.П. Жижченко, В.А. Лукьянчиков

Расчет спада активности радионуклидов как функции расстояния

Выведено уравнение расчета спада уровня радиации и активности радионуклидов как функции удаления от разрушенного атомного реактора. Введено понятие однокилометровой зоны – территории, от которой отсчитывается спад параметров радиоактивности.

V.I. Primenko, B.T. Kanunnikov, A.P. Zhizhchenko, V.A. Luk'yanchikov

Calculation of decreasing of radionuclides activity as the function of the distance

The equation for calculation of decreasing the level of radiation and activity of radionuclides as a function of the distance to destroyed atomic reactor is given. The term of one-kilometre zone – the territory from which the calculation of decreasing the radionuclides activity is initiated – is introduced.