

УДК 504.75.05:621.311.25(045)

¹В. І. Применко, д-р техн. наук, проф.
²В. А. Лук'янчиков, голов. фахівець
³А. В. Лук'янчиков, асист.

ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ РАДІАЦІЙНОГО ЗАРАЖЕННЯ У РАЗІ АВАРІЇ НА РАДІАЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

^{1,3}НАУ, кафедра безпеки життєдіяльності: www.nau.edu.ua

²Дочірня компанія "Газ України"

^{2,3}e-mail: luka@ipnet.kiev.ua

Розроблено методику моделювання стану радіоактивного забруднення в осередку зараження у разі аварії на радіаційно-небезпечних об'єктах на будь-який час після аварії.

This article considers developed method of radioactive pollution state modeling in contamination area in case emergency at radioactive dangerous objects and during any term after it.

Вступ

Важливо завчасно передбачати можливі масштаби та рівень небезпеки у випадку аварії на радіаційно-небезпечних об'єктах. Це дозволяє здійснювати планування місць безпечного мешкання та праці населення, ізоляцію його від місць розташування радіаційно-небезпечних об'єктів. Надалі слід визначати інтенсивність спаду рівня радіації та зміни масштабів забруднення, що викликані ним.

Постановка завдання

Змодельовати зону радіоактивного забруднення на підставі даних про активність викиду та метеорологічних умов, що його супроводжують. Обґрунтувати зв'язок між рівнем радіації та активністю радіонуклідів.

Розробити обґрунтовану послідовність операцій математичного моделювання радіаційної ситуації після аварії на радіаційно-небезпечних об'єктах для прогнозування і можливості контролю рівня опромінення співробітників підприємства та населення, що опинилися в осередку зараження.

Розрахунок спаду рівня активності радіонуклідів як функції віддалі

Згідно з даними [1; 2] про зараження території внаслідок повної аварії на АЕС реактора потужністю 1000 МВт концентрація радіонуклідів на поверхні зони відповідатиме річним дозам опромінення, наведеним у таблиці.

У наведеній таблиці дві останні залежності між дозою і площею землі, де концентрація радіонуклідів і створює цю дозу, одержано лінійною екстраполяцією попередніх даних. Це потрібно для визначення межі зони радіаційного

забруднення, що відповідає вимогам Закону України [1].

Додаткові річні дози опромінення і відповідні їм площі в осередку радіаційного зараження

Річні дози опромінення D , бер	Площа S , км ²
100	50
50	100
10	500
2	2300
0,2	20000
0,1	35000

Наведені дані використали для моделювання осередку радіоактивного зараження (рисунок).

Згідно з працею [3] осередок являє собою сектор круга з кутом 40° , розташований симетрично відносно осі вітру. Віддаль від місця аварії (реактора) до зовнішньої межі осередку позначимо через R_7 .

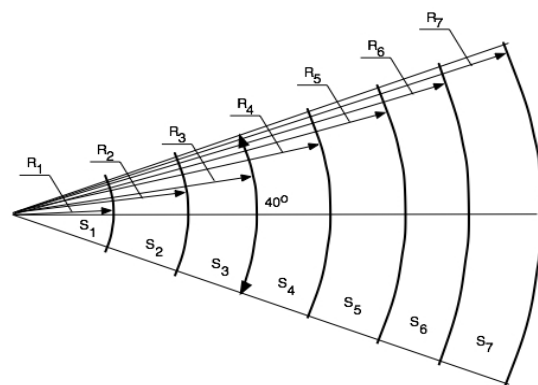


Схема ймовірного зараження у разі аварії на радіаційно-небезпечному об'єкті

Протяжність першої зони осередку зараження припускаємо рівною одному кілометру від місця аварії, а щільність забруднення – постійною на всій її протяжності. В інших зонах щільність зараження зменшується зі збільшенням віддалі від місця аварії. Згідно з рисунком довжину відповідних зон можна записати так:

$$L_1 = R_1 = 1 \text{ км}, L_2 = R_2 - R_1, L_3 = R_3 - R_2, \\ L_4 = R_4 - R_3, L_5 = R_5 - R_4, L_6 = R_6 - R_5, L_7 = R_7 - R_6.$$

Оскільки кут сектора зараження становить 40° , то його площу можна описати рівнянням:

$$S = \pi R^2 \frac{40^\circ}{360^\circ} = \frac{\pi R^2}{9}.$$

Розв'язуючи його відносно R , одержимо:

$$R^2 = \frac{9S}{\pi} \quad \text{і} \quad R = \sqrt{\frac{9}{\pi} S} = 1,693\sqrt{S}.$$

Розраховуючи одержане рівняння, можна встановити віддаль R від місця аварії до зовнішньої межі кожної зони:

$$R_1 = 1 \text{ км}; \\ R_2 = 1,693\sqrt{50} \approx 12 \text{ км}; \\ R_3 = 1,693\sqrt{50+100} \approx 21 \text{ км}; \\ R_4 = 1,693\sqrt{50+100+500} \approx 43 \text{ км}; \\ R_5 = 1,693\sqrt{2950} \approx 92 \text{ км}; \\ R_6 = 1,693\sqrt{22950} \approx 256 \text{ км}; \\ R_7 = 1,693\sqrt{57950} \approx 408 \text{ км}.$$

Знаючи дози опромінення на межах зон протягом року (див. таблицю і рисунок), можна визначити рівні радіації на них на першу годину після аварії за формулою

$$D = 2P_1(t_{\text{вих}}^{0,5} - t_{\text{вх}}^{0,5}).$$

$$\text{Звідси } P_1 = \frac{D}{2(t_{\text{вих}}^{0,5} - t_{\text{вх}}^{0,5})}.$$

Якщо $t_{\text{вх}} = 1$ год і $t_{\text{вих}} = 8760$ год (1 рік), то

$$\text{одержуємо } P_1 = \frac{D_{\text{річ}}}{185}.$$

Таким чином, на межах зон (див. рисунок) рівні радіації відповідно до річних доз будуть мати такі значення:

$$D_2 = 100 \text{ бер/рік}, R_2 = 12 \text{ км}, P_{1-12} = 0,540 \text{ бер/год}; \\ D_3 = 50 \text{ бер/рік}, R_3 = 21 \text{ км}, P_{1-21} = 0,270 \text{ бер/год}; \\ D_4 = 10 \text{ бер/рік}, R_4 = 43 \text{ км}, P_{1-43} = 0,054 \text{ бер/год}; \\ D_5 = 2 \text{ бер/рік}, R_5 = 92 \text{ км}, P_{1-92} = 0,0108 \text{ бер/год}; \\ D_6 = 0,2 \text{ бер/рік}, R_6 = 256 \text{ км}, \\ P_{1-256} = 0,00108 \text{ бер/год}; \\ D_7 = 0,1 \text{ бер/рік}, R_7 = 408 \text{ км},$$

$$P_{1-408} = 0,00054 \text{ бер/год}.$$

Знаючи рівні радіації на різних віддаль від місця аварії, можна визначити взаємозв'язок між ними. З цією метою запишемо рівняння взаємозв'язку у загальному вигляді:

$$P_{1-L} R_L^n = \text{const}.$$

Тоді

$$P_{1-12} R_2^n = P_{1-21} R_3^n = P_{1-43} R_4^n = P_{1-92} R_5^n = \\ = P_{1-256} R_6^n = P_{1-408} R_7^n.$$

$$\text{При цьому } n = \frac{\lg P_{1-12} - \lg P_{1-21}}{\lg R_3 - \lg R_2}.$$

Розрахувавши всі 15 можливих значень n для цього випадку, визначимо

$$n_{\text{сеп}} = \sum \frac{n_i}{15} = 1,985;$$

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

Звідси рівняння взаємозв'язку між рівнем радіації і віддаллю у загальному вигляді можна записати у вигляді

$$P_{1-L} R_L^2 = \text{const}.$$

$$\text{Звідси } P_{1-L} = P_{1-1} L^{-2}.$$

Значення рівня радіації в однокілометровій зоні можна розраховувати із співвідношення:

$$P_{1-1} R_1^2 = P_{1-2} R_2^2 = P_{1-21} R_3^2 = P_{1-43} R_4^2 = \\ = P_{1-92} R_5^2 = P_{1-256} R_6^2 = P_{1-408} R_7^2.$$

При цьому середнє значення із шести розрахованих становить 90 бер/год, тобто

$$P_{1-1} = 90 \text{ бер/год}.$$

На основі взаємозв'язку рівня радіації з віддаллю можна вивести рівняння, що пов'язує зміну активності радіонуклідів з відстанню від зруйнованого реактора. Запишемо систему рівнянь:

$$P_{1-L} = P_{1-1} L^{-2}; \\ A_{1-L} = k P_{1-L}.$$

$$\text{Тоді } A_{1-L} = k P_{1-L} = k P_{1-1} L^{-2}.$$

Однак

$$P_{1-1} = \frac{A_{1-1}}{k}.$$

Отже,

$$A_{1-L} = k P_{1-1} L^{-2} = \frac{k A_{1-1}}{k L^2} = A_{1-1} L^{-2}.$$

Тобто

$$A_{1-L} = A_{1-1} L^{-2}.$$

Практичне використання цього рівняння потребує знання величини A_{1-1} .

Перше значення її може бути розраховане для повного викиду активності з реактора РБМК-1000 ($2 \cdot 10^9$ Ки = 74 ЕБк). При цьому абсолютна активність осередку зараження $N_{зар}$ становитиме 0,5% від викиду [2], тобто $N_{зар} = 1 \cdot 10^7$ Ки = 0,37 ЕБк. Для цього випадку $R_7 = 408$ км, а питома активність A_{1-408} становитиме $5,4$ Ки/км² = $0,2$ ТБк/км².

Використовуючи рівняння

$$A_{1-1} = A_{1-L} L^2,$$

знаходимо, що $A_{1-1} = 898\ 906$ Ки/км² = $33,3$ ПБк/км². Оскільки площа однокілометрової зони становить $0,35$ км², то абсолютна активність її дорівнює $314\ 617$ Ки = $11,6$ ПБк, або $3,15\%$ від $N_{зар}$.

Наступні обчислювання виконували, зменшуючи відповідно активність викиду на порядок. При цьому припускали, що площа осередку зараження зменшується пропорційно, тобто теж у десять разів.

Для викиду $2 \cdot 10^8$ Ки = $7,4$ ЕБк абсолютна активність в однокілометровій зоні становила $3,15\%$ від $N_{зар}$. Для викиду $2 \cdot 10^7$ = $0,74$ ЕБк ця величина становила $3,17\%$ від $N_{зар}$, для викиду $2 \cdot 10^6$ Ки = 74 ПБк – $3,14\%$ від $N_{зар}$, а для викиду $2 \cdot 10^5$ Ки = $7,4$ ПБк – $3,14\%$ від $N_{зар}$.

Це дозволило провести усереднення і припустити, що абсолютна активність в однокілометровій зоні становить $3,15\%$ від активності в осередку зараження.

Оскільки $N_{зар}$ становить $0,5\%$ від $N_{вик}$ [2], то

$$\text{можна записати: } A_{1-1} = \frac{N_{вик}}{200} \frac{3,15}{100} \frac{1}{0,35} =$$

$$= 4,5 \cdot 10^{-4} N_{вик}, \text{ де } N_{вик} - \text{активність викиду,}$$

Ки/км² або МБк/км²; A_{1-1} залежно від $N_{вик}$ може бути виражено в кюрі або в мегабекерелях.

Одержане рівняння дозволяє виконувати моделювання стану радіоактивного забруднення в зоні радіаційного зараження.

Моделювання стану радіоактивного забруднення в зоні радіаційного зараження

Масштаби будь-якої радіаційної катастрофи оцінюються активністю викиду радіонуклідів у навколишнє середовище. Наприклад, для Чорнобильської катастрофи це значення становить 50 МКи = $1,85$ ТБк.

Розрахунок активності виконують за кожним радіонуклідом окремо:

$$N_i = \frac{\ln 2 N_0 G}{T_{1/2} M_i},$$

де $N_0 = 6,022045 \cdot 10^{23}$ – число Авагадро;

G – маса радіонукліда, г; $T_{1/2}$ – період піврозпаду радіонукліда, с; M_i – масове число i -го радіонукліда.

Після цього визначають сумарну активність радіонуклідів:

$$N = \sum N_i = N_1 + N_2 + \dots + N_n.$$

Сумарна активність радіонуклідів характеризується як активність викиду $N_{вик}$.

Ця основна величина характеризує масштаби та рівень небезпеки катастрофи [2]. Саме величина викиду радіонуклідів є основою моделювання радіаційної ситуації. На підставі попереднього розрахунку спаду рівня активності радіонуклідів пропонуємо таку послідовність операцій моделювання:

1. За відомим на час аварії азимутом вітру і активністю викиду сформувати осередок зараження – сектор круга з кутом 40° , розташований симетрично відносно осі вітру, центр круга – зруйнований реактор. Зовнішня межа (глибина) осередку зараження L визначається в кілометрах за рівнянням

$$L = \sqrt{\frac{A_{1-1}}{A_{1-L}}}.$$

При цьому

$$A_{1-L} = 5,4 \text{ Ки/км}^2 = 200 \text{ ГБк/км}^2;$$

$A_{1-1} = 4,5 \cdot 10^{-4} N_{вик}$ (Ки/км² або МБк/км² за лежно від $N_{вик}$, яке можна виражати в кюрі або мегабекерелях.

Якщо підприємство опинилось в осередку радіоактивного зараження, виконуємо моделювання, пов'язане з дослідженням стану радіоактивного забруднення і прийняттям адекватних дій.

2. За відомим значенням абсолютної активності викиду $N_{вик}$ обчислюємо активність утвореного осередку зараження (ГБк):

$$N_{зар} = 0,005 N_{вик}, \text{ Ки} = 0,185 N_{вик}.$$

Знаючи величину $N_{зар}$, розраховуємо значення активності радіонуклідів в однокілометровій зоні (ГБк):

$$N_{1-1} = 3,15 \cdot 10^{-2} N_{зар}, \text{ Ки} = 1,17 N_{зар}.$$

За встановленою величиною N_{1-1} обраховуємо відносну активність в однокілометровій

зоні (ГБк/км²):

$$A_{1-1} = \frac{N_{1-1}}{0,35}, \text{Ки/км}^2 = 0,106N_{1-1}.$$

3. Визначаємо питому активність радіонуклідів на території підприємства, що опинилось в осередку зараження (Ки/км²):

$$A_{1-L} = A_{1-1}L^{-2}.$$

Тут L – віддалення підприємства від зруйнованого реактора, км. Визначають за топографічною картою як пряму, що з'єднує зруйнований реактор і підприємство.

За одержаним значенням A_{1-L} подаємо наближену оцінку згідно із Законом України [1], тобто до якої зони забруднення належить дане підприємство, оскільки A_{1-L} – це сумарна активність α -, β -, γ - радіонуклідів, а закон [1] регламентує зони за активністю лише цезію-137, стронцію-90, плутонію-239. Однак імовірність такої оцінки дуже висока, бо ці радіонукліди є домінуючими у відповідних групах α -, β -, γ - випромінювачів. Така оцінка зразу ж спонукатиме до конкретних дій залежно від установленної зони:

- 1) зона відчуження – $A_{1-L} > 54,5$ Ки/км² (або 2,02 ГБк/км²);
- 2) зона обов'язкового відселення – 18,1 (або 0,67 ГБк/км²) $< A_{1-L} < 54,5$ Ки/км² (або 2,02 ГБк/км²);
- 3) зона добровільного відселення – 5,155 (або 0,191 ГБк/км²) $< A_{1-L} < 18,1$ Ки/км² (або 0,67 ГБк/км²);
- 4) зона посиленого радіоекологічного контролю – 1,02 (або 37,7 ГБк/км²) $< A_{1-L} < 5,155$ Ки/км² (або 0,191 ГБк/км²).

4. Частина працівників підприємства буде змушена певний час працювати в умовах радіаційного захисту. Для цього потрібно розрахувати добову дозу опромінення:

$$D = 2P_1(t_{\text{вих}}^{0,5} - t_{\text{вх}}^{0,5}).$$

Значення P_{1-L} знаходимо за рівнянням

$$P_{1-L} = \frac{A_{1-L}}{k},$$

де коефіцієнт k залежно від зростання номера зони радіоактивного забруднення набуває значень: 3, 6, 8, 10. Розрахована таким чином доза характеризується як фактична – D_{ϕ} .

В умовах радіоактивного захисту визначають

коефіцієнт достатньої захищеності: $C = \frac{D_{\phi}}{D_3}$,

де D_3 – задана добова доза опромінення.

Коефіцієнт C розраховуємо за рівнянням

$$C = \frac{24}{\frac{t_1}{k_{\text{осл},1}} + \frac{t_2}{k_{\text{осл},2}} + \dots + \frac{t_n}{k_{\text{осл},n}}}.$$

У наведеному рівнянні

$$t_1 + t_2 + \dots + t_n = 24.$$

Методом підбору відповідного режиму діяльності встановлюють таке значення коефіцієнта C , яке не менше, ніж одержане за рівнянням:

$$C = \frac{D_{\phi}}{D_3}.$$

Розрахунки режиму радіаційного захисту можна припинити за умови, що $D_{\phi} \leq D_3$, тобто фактична доза опромінення буде меншою або дорівнювати заданій.

Виконане на основі викладеного моделювання дозволяє прогнозувати і контролювати рівень опромінення виконавців, що перебувають в осередку радіоактивного забруднення.

Висновки

Виконано математичний опис залежності рівня радіації від відстані від місця викиду радіонуклідів.

Розроблено методику моделювання стану радіоактивного забруднення в осередку зараження у разі аварії на радіаційно-небезпечних об'єктах на будь-який час після аварії. Методика дозволяє математично прогнозувати зовнішню межу (глибину) осередку зараження та рівень зараження у будь-якій його точці, оцінювати зону забруднення згідно із Законом України [1], планувати час безпечного перебування в осередку радіоактивного забруднення, контролюючи рівень опромінення працівників.

Література

1. Закон України “Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи” від 27.02.1991 р. //Web-сторінка <http://rada.gov.ua>
2. Мясников В.В. Защита от оружия массового поражения. – М: Воен. изд-во, 1989.
3. Радиационная и химическая безопасность на воздушном транспорте / Б. Б. Иванов, Н. Ф. Наумов, В. К. Пастухов, В. И. Применко – К.: КИИГА, 1993.

Стаття надійшла до редакції 02.02.07.