

УДК 504.75.054:621.311.25(45)

<sup>1</sup> В.І. Применко, д-р техн. наук<sup>2</sup> Б.Т. Канунніков<sup>3</sup> О.П. Жижченко<sup>4</sup> В.А. Лук'янчиков**МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАЦІЙНОЇ ОБСТАНОВКИ В ЗОНІ ЗАРАЖЕННЯ**<sup>1,2,3</sup> Інститут екології та дизайну НАУ, e-mail: itt @ nau.edu.ua; www. nau.edu.ua<sup>4</sup> Дочірня компанія „Газ України”, e-mail: luk @ ukr.net

*Запропоновано модель розрахунку режиму радіаційного захисту персоналу підприємств, що опинилися в зоні зараження після аварії на атомному реакторі.*

**Вступ**

При катастрофах на АЕС надзвичайно актуально для підприємств своєчасно визначити, коли має відбутися радіоактивне зараження підконтрольної території, кількісно охарактеризувати його рівень, оскільки це дозволить вжити адекватні пропозиції.

**Постановка задачі**

Безпека дії на радіаційно-забрудненій території залежить від значення рівня активності радіонуклідів на поверхні ґрунту, оскільки вони спричиняють зовнішнє опромінення людини.

У зв'язку з цим виникає необхідність у створенні експрес-методу розрахунку активності забруднення як функції сумарної активності викиду.

При цьому активність слід зв'язувати з рівнем радіації, що дозволяє обраховувати дозу зовнішнього опромінення людини.

Разом з тим у разі тривалого перебування на забрудненій території певна частина радіонуклідів у вигляді забрудненого повітря та їжі може потрапити до організму людини, що спричинить внутрішнє опромінення її.

Розрахунок сумарної дози внутрішнього опромінення людей, що працюють на радіаційно-забруднених територіях, дозволить регулювати час роботи і перебування їх на цих територіях.

**Розрахунок режиму радіаційного захисту від зовнішнього опромінення**

Масштаби радіаційної катастрофи оцінюються активністю викиду радіонуклідів в навколишнє середовище. Наприклад, унаслідок чорнобильської трагедії сумарний викид продуктів ділення (без радіоактивних благородних газів) становив близько 50 МКі (1850 ПБк), що відповідає приблизно 3,5 % загальної кількості радіонуклідів, які були напрацьовані в реакторі [1].

Активність кожного радіонукліда розраховують окремо за формулою [2] :

$$N_i = \frac{3,7 \cdot 10^{10} L_n 2m_i N_A}{T_{1/2_i} A_i},$$

де  $N_i$  – абсолютна активність  $i$ -го радіонукліда, Бк;  $L_n$  – віддаль підприємства від аварійного реактора, яка визначається на топографічній мапі як пряма, що з'єднує аварійний реактор і підприємство;  $m_i$  – маса  $i$ -го радіонукліда, г;  $T_{1/2_i}$  – період напіврозпаду  $i$ -го радіонукліда, с;  $N_A$  – число Авогадро:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1},$$

$A_i$  – масове число  $i$ -го радіонукліда.

Після цього визначають сумарну активність радіонуклідів, що характеризується як активність викиду,  $N_{\text{вик}}$ .

Ця величина характеризує масштаб і ступінь небезпеки (наслідків) від аварії на атомному реакторі [1].

Саме величина викиду радіонуклідів є основою моделювання радіаційної обстановки.

На основі розробок, наведених у працях [3–5], пропонуємо таку послідовність операцій моделювання.

За відомим на час аварії азимутом вітру  $A_v$  і абсолютною активністю викиду  $N_{\text{вик}}$  моделюємо зону зараження як сектор кола з кутом  $40^\circ$ , що розташований симетрично відносно осі вітру. Центр кола – район зруйнованого реактора [5].

Зовнішній кордон (глибина) зони зараження визначаємо за рівнянням

$$L = \sqrt{\frac{A_{1-1}}{A_{1-L_{\text{зар}}}}},$$

де  $A_{1-1}$  – щільність забруднення за 1 год після аварії на відстані 1 км від аварійного реактора;  $A_{1-L_{\text{зар}}}$  – щільність забруднення за 1 год після аварії на лінії зони зараження.

При цьому [5]

$$A_{1-L_{\text{зар}}} = 199,8 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2};$$

$$A_{1-1} = 4,5 \cdot 10^{-4} N_{\text{вик}}.$$

Якщо підприємство опинилося в зоні радіоактивного зараження, проводимо моделювання, яке пов'язане з дослідженнями стану радіоактивного забруднення і прийняття адекватних дій.

За відомим значенням абсолютної активності викиду  $N_{\text{вик}}$  обчислюємо активність, яка пішла на утворення зони зараження [6]:

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

За визначеною величиною  $N_{\text{зар}}$  обчислюємо значення активності в однокілометровій зоні за 1 год після аварії [5]:

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

За встановленою величиною  $N_{1-1}$  обчислюємо щільність забруднення в однокілометровій зоні за 1 год після аварії  $A_{1-1}$  [5]:

$$A_{1-1} = \frac{N_{1-1}}{350},$$

де  $350 = \pi R \frac{40}{360}$  – площа сектора з кутом  $40^\circ$  і радіусом  $R = 1000$  м.

Розрахуємо за 1 год після аварії щільність забруднення радіонуклідами території підприємства, яке опинилося в зоні зараження, за формулою [5]:

$$A_{1-L_n} = A_{1-1} \cdot L_n^{-2}.$$

За одержаним значенням  $A_{1-L_n}$  надаємо наближену оцінку радіаційної обстановки на території підприємства, що опинилося в зоні зараження.

Для цього згідно з вимогами закону України [7] визначаємо, до якої зони зараження належить територія даного підприємства:

– зона відчуження № 1:

$$2016,5 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2} \leq A_{1-L_n};$$

– зона обов'язкового відселення № 2:

$$669,7 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2} \leq A_{1-L_n} < 2016,5 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2};$$

– зона добровільного відселення № 3:

$$190,7 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2} \leq A_{1-L_n} < 669,7 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2};$$

– зона посиленого контролю № 4:

$$37,74 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2} \leq A_{1-L_n} < 190,7 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}.$$

Оскільки  $A_{1-L_n}$  – це сумарна щільність забруднення альфа-, бета- і гамма-радionуклідами, а закон [7] регламентує зони лише за активністю цезію-137, стронцію-90 та плутонію-239, право-

мірність такої оцінки буде дуже велика, оскільки вказані радionукліди є домінуючими у відповідних групах випромінювачів.

Установлена оцінка одразу ж спонукатиме до адекватних дій залежно від визначеної зони зараження.

Частина співробітників підприємства буде змушена певний час працювати в умовах радіаційного захисту. Для його здійснення необхідно розрахувати добову фактичну дозу зовнішнього опромінення за формулою [3]:

$$D_{\phi} = 0,55 \cdot 2 \dot{D}_{1-L_n} (t_{к.3}^{0,5} - t_{п.3}^{0,5}),$$

де  $\dot{D}_{1-L_n}$  – потужність поглинутої дози за 1 год після аварії на відстані  $L_n$ , км;  $t_{к.3}$  – час кінця зараження впродовж першої доби, год;  $t_{п.3}$  – час початку зараження на території підприємства, год.

При цьому потужність дози  $\dot{D}_{1-L_n}$  визначають за рівнянням

$$\dot{D}_{1-L_n} = \frac{A_{1-L_n}}{K_{\text{п}}},$$

коефіцієнт пропорційності  $K_{\text{п}}$  залежить від зростання номера зони радіаційного зараження [3]:

$$K_{\text{п}} = 3, K_{\text{п}} = 6, K_{\text{п}} = 8, K_{\text{п}} = 10.$$

Час початку зараження  $t_{п.3}$  розраховують за формулою

$$t_{п.3} = \frac{L_n}{\bar{V}} + 1,$$

де  $\bar{V}$  – швидкість середнього вітру на території підприємства, км·год<sup>-1</sup>.

Час кінця зараження  $t_{к.3}$  обчислюють за виразом

$$t_{к.3} = t_{п.3} + 24.$$

Розрахована таким чином поглинута доза характеризується як фактична  $D_{\phi}$ .

Для визначення режиму радіаційного захисту на першу добу після початку зараження розрахуємо коефіцієнт достатньої захищеності  $C_p$  за формулою

$$C_p = \frac{24}{\frac{t_1}{K_{\text{пос1}}} + \frac{t_2}{K_{\text{пос2}}} + \frac{t_3}{K_{\text{пос3}}}} \geq C_{\phi},$$

$$t_1 + t_2 + t_3 = 24 \text{ год},$$

де  $C_{\phi}$  – фактичний коефіцієнт достатньої захищеності.

Термін перебування в сховищі, на відкритій місцевості, у цегляному будинку з відповідними

коефіцієнтами послаблення зовнішнього гамма-опромінення  $K_{\text{пос}1} = 1000$ ;  $K_{\text{пос}2} = 1$ ;  $K_{\text{пос}3} = 5$  становить 1 добу. Методом підбору відповідного безпечного режиму діяльності і відпочинку впродовж першої доби встановлюється таке значення коефіцієнта  $C_p$ , яке не буде меншим ніж одержане  $C_\phi$ , яке розраховують за формулою:

$$C_\phi = \frac{D_\phi}{D_{\text{зад}}}$$

де  $D_{\text{зад}}$  – задана (встановлена) поглинута доза зовнішнього гамма-опромінення для персоналу підприємства, яку він має не перевищувати впродовж першої доби, мГр.

Розрахунки режиму радіаційного захисту можна припинити за умови, якщо  $D_\phi \leq D_{\text{зад}}$ . Тобто фактично поглинута доза зовнішнього гамма-опромінення буде меншою або дорівнювати заданій.

#### Розрахунок річної еквівалентної дози внутрішнього гамма-опромінення

Доза внутрішнього гамма-опромінення організму людини внаслідок прийняття їжі й вдихання зараженого повітря може бути обрахована на основі підрахунку введеної активності цезію-137. При цьому величину сумарної активності всіх радіонуклідів, що надійшли до організму людини через вдихання зараженого повітря, вживання заражених продуктів харчування, питної води і куріння зараженого тютюну впродовж року  $N_{\text{заг}}$ , визначають за формулою

$$N_{\text{заг}} = N_{\text{пр}} + N_{\text{пов}}$$

де  $N_{\text{пр}}$  – загальна абсолютна активність радіонуклідів, що надійшла до організму людини з продуктами харчування і тютюном впродовж року, Бк;  $N_{\text{пов}}$  – загальна абсолютна активність радіонуклідів, що надійшли до організму людини з пилом повітря під час дихання впродовж року, Бк.

Активність радіонуклідів  $N_{\text{пр}}$  розраховують за формулою

$$N_{\text{пр}} = C G$$

де  $C$  – ступінь радіаційного забруднення продуктів харчування і питної води, Бк·кг<sup>-1</sup>;  $G$  – вага продукту, кг.

Державним гігієнічним нормативом [8] допускається до реалізації продукти з відповідним ступенем забруднення, що забезпечує неперевищення межі річної ефективності, очікуваної дози опромінення населення 1 мЗв за рахунок внутрішнього опромінення окремо від цезію-137 і стронцію-90 (табл. 1).

Таблиця 1

#### Граничні рівні вмісту радіонукліда

Назва продукту	Питома активність, Бк·кг <sup>-1</sup> (Бк·л <sup>-1</sup> )	
	цезію-137	стронцію-90
Питна вода	0,185·10 <sup>-2</sup>	0,037·10 <sup>-2</sup>
Молоко і молочні продукти	3,70·10 <sup>-2</sup>	0,37·10 <sup>-2</sup>
М'ясо, птиця, риба, яйця	7,40·10 <sup>-2</sup>	–
Картопля та інші овочі	5,92·10 <sup>-2</sup>	0,37·10 <sup>-2</sup>
Хліб, хлібопродукти, борошно, цукор	3,7·10 <sup>-2</sup>	0,37·10 <sup>-2</sup>
Свіжі фрукти, ягоди, гриби	14,80·10 <sup>-2</sup>	–
Продукти дитячого харчування	1,85·10 <sup>-2</sup>	0,037·10 <sup>-2</sup>
Лікарські рослини	74,00·10 <sup>-2</sup>	–

При цьому сумарна активність добового раціону становить 210 Бк·доб<sup>-1</sup> для цезію-137 та 35 Бк·доб<sup>-1</sup> для стронцію-90, які надходять протягом року в організм з продуктами харчування та питною водою.

Референтний склад середньорічного добового раціону дорослої особи наведено в табл. 2.

Таблиця 2

#### Середньорічний добовий раціон

Продукти	Добове споживання
М'ясо і м'ясні продукти з перерахунку на м'ясо, кг	0,186
Молоко і молочні продукти в перерахунку на молоко, кг	1,022
Яйця	0,745
Риба, кг	0,048
Картопля, кг	0,359
Овочі, кг	0,279
Фрукти, кг	0,129
Хліб, кг	0,386
Разом	2,410

Основними параметрами розрахунку активності радіонуклідів, що надійшли при вдиханні зараженого повітря, є:

- вентиляція легенів (4–6 л·хв<sup>-1</sup> повітря у спокійному стані і до 20 л·хв<sup>-1</sup> при фізичному навантаженні);
- середня запиленість міського повітря (100 мг·м<sup>-3</sup>, а при проведенні певних сільськогосподарських робіт в десятки разів більша);
- рівень забруднення ґрунту в зоні радіоекологічного контролю (11,1 10<sup>5</sup> Бк·кг<sup>-1</sup>).

Критерій розрахунку внутрішньої дози опромінення становить при надходженні до організму людини  $2,44 \cdot 10^4$  Бк цезію-137. У ньому протягом року формується еквівалентна доза  $H_{T \text{ вну}}$  1 мЗв, тоді

$$H_{T \text{ вну}} = \frac{\sum N_{\text{зат.вн}} \gamma}{2,44 \cdot 10^4}.$$

Однак паралельно надходженню цезію-137 до організму людини іде процес його виведення – релаксація.

### Висновки

Розроблено експресний метод розрахунку режиму радіаційного захисту від зовнішнього опромінення, в основі якого покладено встановлення функціональної залежності активності радіонуклідів як функції віддалі. Уведено поняття однокілометрової зони сектора радіоактивного зараження.

Установлено функціональний зв'язок між активністю і рівнем радіації, що дозволяє розрахувати дозу зовнішнього опромінення.

На основі функціональної залежності між визначеною активністю радіонуклідів і дозою опромінення, яку вони формують протягом року, запропоновано методику розрахунку внутрішньої дози опромінення.

### Список літератури

1. Пристер Б.С., Лоцилов Н.А., Немец О.Ф., Поярко В.А. Основы сельскохозяйственной радиологии. – 2-е изд., переработ. и доп. – К.: Урожай, 1991. – 472 с.
2. Державні гігієнічні нормативи “Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)”. – К.: 1997. – 121 с.
3. Канунніков Б.Т., Лук'янчиков В.А., Применко В.І. Моделювання осередку радіоактивного зараження при аварії на атомному реакторі // Вісн. НАУ. – 2002. – №4. – С. 186–189.
4. Канунніков Б.Т., Жижченко О.П., Лук'янчиков В.А., Применко В.І. Розрахунок спаду рівня активності радіонуклідів при аварії на атомному реакторі // Вісн. НАУ. – 2003. – №3–4. – С. 180–182.
5. Применко В.І., Канунніков Б.Т., Жижченко О.П., Лук'янчиков В.А. Розрахунок спаду радіонуклідів як функції віддалі // Вісн. НАУ. – 2004. – № 1. – С. 158–161.
6. Месников В.В. Защита от оружия массового поражения. – М.: Воениздат, 1989. – 398 с.
7. Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок чорнобильської катастрофи: Закон України від 27.02.1991 р. // ВВРУ. 1991. – № 16. – 199 с.
8. Державні гігієнічні нормативи допустимого рівня вмісту радіонуклідів цезію-137 і стронцію-90 у продуктах харчування та питній воді (ДР-97). – К. – 1997. – 6 с.

Стаття надійшла до редакції 16.06.04.

В.І. Применко, Б.Т. Канунніков, А.П. Жижченко, В.А. Лук'янчиков

Моделирование радиационной обстановки в зоне заражения

Предложена модель расчета режима радиационной защиты персонала предприятий, которые оказались в зоне заражения после аварии на атомном реакторе.

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

Modeling of the radioactive situation in contaminated zone

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