

УДК 504.3:614.841

С.І. АЗАРОВ, В.Л. СИДОРЕНКО, Ю.П. СЕРЕДА

ОЦІНКА РАДІАЦІЙНОГО РИЗИКУ ПРИ ГАСІННІ ПОЖЕЖІ У ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ

***Анотація.** Наведено оцінку радіаційного ризику для працівників пожежно-рятувальних підрозділів при гасінні пожеж у Чорнобильській зоні. Показано, що межа радіаційного ризику для пожежного у цих умовах може перевищувати граничний індивідуальний радіаційний ризик.*

***Ключові слова:** Чорнобильська зона, пожежа, радіоактивні продукти згоряння, опромінення, радіаційний ризик.*

Вступ. На територію 30-кілометрової зони Чорнобильської АЕС випало у вигляді радіоактивних аерозолів приблизно $5 \cdot 10^{15}$ Бк, з них $3 \cdot 10^{13}$ Бк припадає на трансуранові елементи (ТУЕ). Найбільша густина забруднення ґрунту сягає для ^{137}Cs понад $8 \cdot 10^{12}$ Бк/км², для ^{90}Sr – $7 \cdot 10^{12}$ Бк/км² і плутонію – $3 \cdot 10^{10}$ Бк/км². За час після Чорнобильської катастрофи в 30-кілометровій зоні сталося більш 1 200 пожеж різного характеру, в результаті чого згоріло 3 092 різних будов і близько 15 000 га лісів та великих сільгоспугідь [1].

В табл. 1 наведені дані про радіоактивне забруднення різних об'єктів та територій Чорнобильської зони.

Таблиця 1. Запаси радіонуклідів на різних об'єктах та територіях Чорнобильської зони

Об'єкт чи територія	Активність, Бк			Площа, км ² (кількість, шт.)
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	ТУЕ	
Територія Чорнобильської зони	$1,44 \cdot 10^{13}$	$6,4 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^{10}$	2 044
Ліси	$8,4 \cdot 10^{13}$	$3,7 \cdot 10^{11}$	$1,5 \cdot 10^{10}$	768
Колишні сільгоспугіддя	$6,1 \cdot 10^{13}$	$2,7 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	484
Пункт захисту радіоактивних відходів	$1,4 \cdot 10^{14}$	$8,2 \cdot 10^{12}$	$3,3 \cdot 10^{11}$	(800)
Об'єкт «Укриття»	$1,3 \cdot 10^{14}$	$7,4 \cdot 10^{13}$	$2,7 \cdot 10^{12}$	(1)

На 01.01.2013 кількість радіоактивних відходів, накопичених на блоках №№ 1–3 ЧАЕС, оцінювалась величиною твердих – 15 000 м³ (активністю $3,38 \cdot 10^6$ Бк), рідких – 18 300 м³, в сховищах відпрацьованого ядерного палива розміщено 13 300 тепловиділяючих збірок.

Основними шляхами міграції радіонуклідів за межі Чорнобильської зони є: водний (річковий) стік (р. Прип'ять) – приблизно 65%; повітряний (вітровий) перенос – 10%; у випадку пожеж – 24%; техногенна міграція та біогенний винос – по 0,5%.

При пожежах в Чорнобильській зоні у повітря можуть викидатися радіоактивні продукти згорання (РПЗ) середньої сумарної активності до 20 Кі/рік ($^{134}\text{Cs} \approx 15,0$ Кі/рік, $^{90}\text{Sr} \approx 4,5$ Кі/рік та ТУЕ $\approx 0,1$ Кі/рік), які несприятливо діють на персонал ЧАЕС та пожежних, що задіяні у гасінні пожежі, а також на населення найближчих територій і навколишнє середовище.

При пожежі в атмосферу надходять РПЗ, концентрація яких може істотно перевищувати гранично допустимі значення. РПЗ, які викидаються у повітря, небезпечні, насамперед, для співробітників пожежних команд, які безпосередньо задіяні у гасінні пожеж. Отже, пожежі на територіях, забруднених радіонуклідами, є одним з потенційно небезпечних джерел дозових навантажень, які можуть вплинути на здоров'я пожежних. Однак, незважаючи на актуальність даної проблеми, практично відсутня інформація щодо впливу радіаційних факторів при гасінні пожеж на забруднених радіонуклідами територіях.

Формулювання цілей статті. Актуальною є задача оцінки радіаційного ризику для працівників пожежно-рятувальних підрозділів при гасінні пожеж у Чорнобильській зоні.

Виклад основного матеріалу. Радіаційний ризик R (далі – ризик) для пожежного, який задіяний у гасінні пожежі, буде визначатися наступним чином:

$$R = \int_E P(E) f [E(Q)] dE, \tag{1}$$

де $P(E)$ – імовірність серйозного порушення здоров'я пожежного від отриманої дози опромінювання E ;

$f [E(Q)]$ – розподіл імовірностей вихідних подій – кількість пожеж на територіях, забруднених радіонуклідами.

Розподіл імовірностей вихідних подій – кількість пожеж можна визначити за формулою:

$$f [Q(\tau)] = \int_0^\tau \int_0^\tau f [Q(\tau)] dQd\tau, \tag{2}$$

де $f [Q(\tau)]$ – параметр, що характеризує частоту пожеж, які призводять до викиду РПЗ в інтервалі від $Q(\tau)$ до $Q(\tau) - dQ(\tau)$. Значення $f [Q(\tau)]$ можна надати у вигляді:

$$f [Q(\tau)] = \mu \left[1 + \mu \ln \left(\frac{Q(\tau)}{\bar{Q}_0} \right) [Q(z) \Delta\tau]^{-1} \right], \tag{3}$$

тут
$$\mu = \left[(2\tau/\lambda)^{0,5} - 1 \right] \left[\ln Q(\tau)/\bar{Q}_0 \right], \tag{4}$$

де \bar{Q}_0 – вміст радіонуклідів у горючих матеріалах;

$Q(\tau)$ – сумарна активність радіонуклідів, викинутих в атмосферу;

Δt – очікуваний період часу між двома пожежами;

λ – коефіцієнт частоти пожеж в Чорнобильській зоні.

Ймовірність серйозного порушення здоров'я пожежного від дії радіації можна представити таким чином [4]:

$$P(E, l) = g \left[H(E, t)_{eff} - H(E, \tau)_{ext} \right], \quad (5)$$

де g – коефіцієнт ризику, який характеризує ймовірність виникнення соматичних та генетичних наслідків опромінення на одиницю дози;

$H(E, t)_{eff}$ – доза зовнішнього опромінення, обумовлена вдиханням РПЗ з повітрям, яке надходить через шлунково-кишковий тракт та відкриті рани;

$H(E, \tau)_{ext}$ – доза внутрішнього опромінення, обумовлена впливом випромінювання радіонуклідів з хмари диму і шлейфу випадіння РПЗ на поверхню.

Ефективну дозу зовнішнього опромінення розраховуємо за формулою [5]:

$$H(E, t) = k_1 k_2 D \gamma \left(\eta + \frac{1 + \eta}{k_3} \right) 10^{-5} t, \quad (6)$$

де k_1 – коефіцієнт переходу від експозиційної дози у повітрі до поглиненої дози у біологічній тканині;

k_2 – коефіцієнт переходу від еквівалентної дози до ефективної дози;

k_3 – коефіцієнт послаблення (екранування) зовнішніми перешкодами γ -опромінення (будівлі, споруди тощо);

η – час знаходження пожежного на відкритій місцевості у процесі гасіння пожежі;

$D\gamma$ – середнє значення потужності експозиційної дози на місцевості;

t – час.

Ефективну дозу внутрішнього опромінення, наприклад інгаляційну, визначали за формулою [6]:

$$H(E, \tau)_{ext} = \sum_j \beta_j G \left\{ \left[\xi + \sigma_j (1 - \xi) \right] \int_0^{\tau_0} C_j(t) d\tau + \int_0^{\tau_n} C_j(\tau) d\tau \right\}, \quad (7)$$

де β_j – коефіцієнт інгаляційної дози для j -го радіонукліда;

G – інтенсивність дихання пожежного в процесі гасіння пожежі, без застосування засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД);

ξ – частка часу, який використовує пожежний під час гасіння пожежі;

σ – коефіцієнт зменшення (вимивання) j -х радіоактивних часток з димової хмари;

$C_j(\tau)$ – концентрація активності j -го РПЗ в повітрі на відстані 1,7 м від поверхні землі;

j – радіонуклід в продуктах згоряння, значимий для інгаляційної дози;
 τ_0 – час знаходження пожежного в районі гасіння пожежі;
 τ_n – час прямування пожежного до району гасіння пожежі.

Рівняння турбулентної дифузії РПЗ, які надходять в атмосферу з осередку пожежі з координатами (x, y, z) , що знаходяться в необмеженому просторі, у наближенні сталості швидкості вітру і коефіцієнтів турбулентної дифузії можна записати наступним чином [7]:

$$\frac{dC}{dt} = \left[k_x \frac{d^2C}{dx^2} + k_y \frac{d^2C}{dy^2} + k_z \frac{d^2C}{dz^2} \right] - \sum_{i=1}^3 V_i \frac{dC_i}{dx_i}; \quad (8)$$

$$-\infty < x, y, z < \infty, \quad t > 0, \quad C(0, 0, h_{eff}, 0) = Q/\Delta W,$$

де $C(x, y, z, t)$ – концентрація РПЗ у повітрі в залежності від просторових координат і часу;

k_x, k_y, k_z – коефіцієнти турбулентної дифузії РПЗ в приземному шарі атмосфери;

V_x, V_y – проекції швидкості вітру на осі x і y відповідно;

V_i – сума швидкостей гравітаційного осідання РПЗ та руху хмари диму у вертикальному напрямку (ось z направлена перпендикулярно до поверхні землі);

Q – сумарна активність γ -, α - і β -радіонуклідів, яка була викинута в атмосферу у процесі пожежі;

ΔW – об'єм ПРЗ, викинута при пожежі в навколишнє середовище;

h_{eff} – ефективна висота підйому димової хмари відносно поверхні землі:

$$h_{eff}(t) = \frac{K_h q(t)^{0,25}}{V_0}, \quad (9)$$

де t – час викиду РПЗ в атмосферу;

K_h – коефіцієнт, який дорівнює 530;

$q(t)$ – потужність теплового потоку над місцем пожежі;

V_0 – швидкість вітру в районі пожежі.

Спростимо вираз (8), зробивши заміну змінних:

$$C(x, y, z, t) = d(x, y, z, t) \exp \left[\frac{V_i(2x - V_i)}{4k_x} \right]; \quad (10)$$

$$\frac{dq}{dt} = k_x \frac{d^2q}{dx^2} + k_y \frac{d^2q}{dy^2} + k_z \frac{d^2q}{dz^2}; \quad (11)$$

$$-\infty < x, y, z < \infty, \quad t > 0, \quad C(0, 0, h_{eff}, 0) = Q/\Delta W.$$

Шукане рішення рівняння (8):

$$C(x, y, z, t) = Q(t)G(x, y, z, t), \quad (12)$$

де

$$G(x, y, z, t) = \prod_{i=1}^3 A_i \exp \left[-\frac{(x-V_i)^2}{4k_x t} - \frac{y^2}{4k_y t} - \frac{(z-h)^2}{4k_z t} \right] \quad (13)$$

є функція Гріна:

$$A_i = \frac{1}{2\sqrt{\pi k_i t}}. \quad (14)$$

Оперативний контроль внутрішнього опромінення здійснюють шляхом індивідуального розрахунку інгалаційного надходження радіоактивних речовин до організму пожежного з наступним зіставленням цього показника з величинами ліміту річного надходження. Розрахунок величини дози проводять на основі розрахункової величини надходження I , яку визначають залежно від виду контролю таким чином:

а) при контролі концентрації C радіонуклідів у повітрі:

$$I = E_C C G t, \quad (15)$$

де E_C – коефіцієнт перерахунку;

G – величина об'єму дихання;

t – час роботи в контрольованих умовах;

б) при контролі вмісту A радіонуклідів у легенях або інших інтегральних величин, таких як відкладення у носовій порожнині та ін.:

$$I = E_A C, \quad (16)$$

де E_1 – коефіцієнт перерахунку.

Остаточну дозу розраховують з використанням дозового коефіцієнта e_{inh} , що відображує радіаційно-гігієнічні умови в процесі гасіння пожежі:

$$E_{inh} = e_{inh} I. \quad (17)$$

З огляду на необхідність урахувувати ймовірнісний характер реального надходження та з метою забезпечити гарантоване неперевищення контрольних рівнів для оцінки необхідно вводити коефіцієнт запасу δ . На підставі

зазначеного застосовують величину так званої попередньої дозової оцінки E_{inhal}^{prev} , яку обчислюють за допомогою величини інгаляційного надходження I з урахуванням коефіцієнта запасу δ та дозового коефіцієнта e_{inh} для даного радіонукліда:

$$E_{inhal}^{prev} = \delta e_{inh} I. \tag{18}$$

Розраховуючи E_{inhal}^n , весь період роботи з ліквідації пожежі розбивають на епізоди (це може бути один-єдиний епізод), які не перетинаються між собою у часі. Дані про концентрацію РПЗ і (або) величину відкладення у відділах респіраторного тракту за кожним епізодом забезпечують фактичними результатами (C, t, A) і характеристиками (ϵ, δ) відповідного інструментального методу контролю. Контроль індивідуального внутрішнього опромінення від інгаляційного надходження впродовж року проводять за сумарною (накопиченою) E_{inhal}^n . Метод, який має більшу вірогідність остаточного результату вимірювання, характеризується меншим значенням δ .

У табл. 2 і 3 наведено значення конверсійних коефіцієнтів і коефіцієнтів запасу, застосовуваних при оперативному контролі E_{inhal}^n . На підставі даних вивчення радіаційних факторів на місці гасіння пожежі в Чорнобильській зоні, перелік цих коефіцієнтів може розширюватись, а їх значення уточнюватись. Значення коефіцієнта запасу $\delta_{ZW}, \delta_{WB}, \delta_{ID}$ встановлено на підставі даних роботи [8].

Таблиця 2. Конверсійні коефіцієнти та коефіцієнти запасу, застосовувані при оперативному контролі E_{inhal}^{prev}

Перехід при розрахунку концентрації та активності	Індекс	Коефіцієнт	
		конверсійний, E	запасу, δ
Від концентрації в зоні пожежі (Z) до концентрації у місці гасіння пожежі (W)	ZW	1	5
Від концентрації на місці пожежі (W) до концентрації в зоні дихання (B)	WB	1	3
Від концентрації в зоні дихання (B) до концентрації інгаляційної фракції (I)	BI	0,005 1	10 1
Від концентрації інгаляційної фракції (I) до відкладення в легенях (D)	ID	3,5	2

Схема формування інгаляційного надходження та відповідна їй система оперативного контролю доз внутрішнього опромінення пожежного зображені на рисунку.

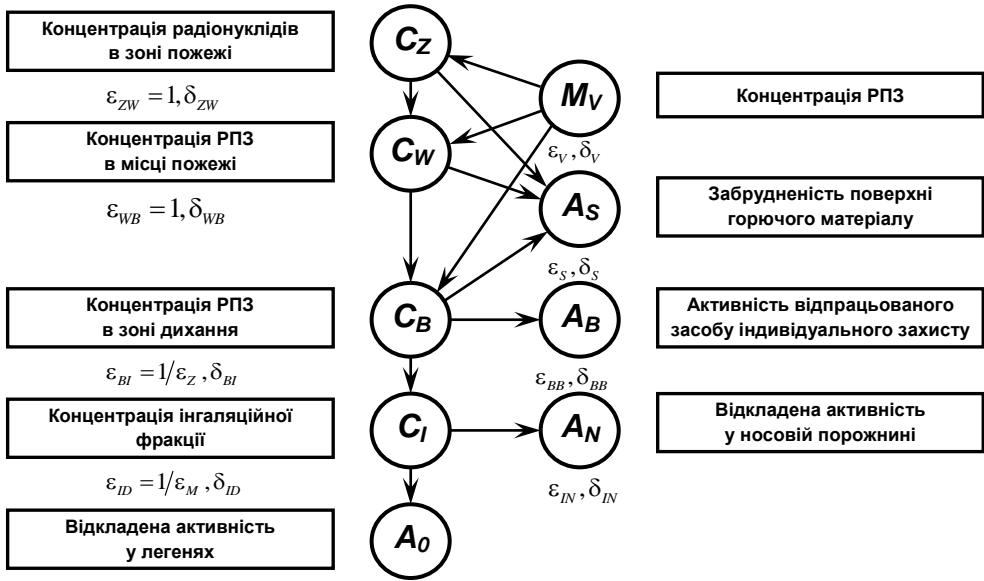


Рис. – Схема формування і контролю інгаляційного надходження, яку використовують для розрахунку E_{inhal}^n

Специфіка контролю радіоактивного забруднення повітря полягає в тому, що використані у формулах коефіцієнти перерахунку ε_C і ε_A включають проміжні коефіцієнти, пов'язані із статистичною природою явищ переходу від вимірювання фізичної величини C до розрахункової величини дози. Конкретні значення таких коефіцієнтів – це параметри відповідних функцій розподілу ймовірностей, які часто описують логарифмічно нормальним законом. При розрахунку величини E_{inh} за даними вимірювання C результуюче стандартне геометричне відхилення (σ) рідко буває меншим 5–6, а часто досягає 10 і більше [9]. З даних типових значень, наведених у [9], випливає, що жодний спосіб вимірювання вмісту радіоактивної речовини в повітрі виробничого приміщення не може забезпечити прийнятної (в метрологічному розумінні) точності оцінки індивідуального внутрішнього опромінення.

Викладене вище свідчить, що формула розрахунку ефективної дози E_{inh} має включати не медіанні та середні значення надходження I , а відповідні достатньо високому (з погляду забезпечення радіаційної безпеки) довірчому інтервалу ймовірності. Це рівнозначно введенню коефіцієнта запасу, який визначають за допомогою довірчого інтервалу ймовірності, розрахованого для відомої функції розподілу. Складові елементарні коефіцієнти запасу для конкретних умов пожежі уточнюють за результатами спеціальних досліджень. Значення довірчого інтервалу ймовірності належить вибирати за спеціальною методикою.

За конверсійний коефіцієнт ε_{ID} прийнято обернену величину коефіцієнта відкладення в легенях L . Його значення розраховано на основі табульованих даних відкладення в різних відділах респіраторного тракту й усередненого розподілу активності РПЗ за аеродинамічним діаметром [10].

Величини коефіцієнта запасу δ_R (табл. 3) були отримані на основі аналізу невизначеності внеску в дозу певного радіонукліда залежно від варіацій, спостережуваних у співвідношеннях радіонуклідів у РПЗ.

Таблиця 3. Коефіцієнти запасу, застосовувані при контролі різних радіонуклідів або груп радіонуклідів при оперативному контролі E_{inh}

Тип випромінювання	^{137}Cs	^{90}Sr	^{238}Pu	$^{239,240}\text{Pu}$	^{241}Am
δ_R	2,8	1,6	1,5	1,0	0,6

Радіаційний ризик для пожежних, які задіяні в гасінні пожеж в Чорнобильській зоні, від внутрішнього та зовнішнього опромінення можливо визначити за формулою [10, 11]:

$$R = R_{int} + R_{inhal} = \int_0^t \alpha_{int} H_{int}(E, t)_i dt + \int_0^t \alpha_{inhal} H_{inhal}(E, t)_i dt, \quad (19)$$

де R_{int} – радіаційний ризик від зовнішнього опромінення;

R_{inhal} – радіаційний ризик від внутрішнього опромінення;

$\alpha_{int}, \alpha_{inhal}$ – коефіцієнти ризику;

$H_{int}(E, t)_i$ – еквівалентна доза зовнішнього опромінення пожежного i -м радіонуклідом за час гасіння пожеж t ;

$H_{inhal}(E, t)_i$ – еквівалентна доза внутрішнього опромінення пожежного i -м радіонуклідом за час гасіння пожеж t .

У табл. 4 наведений розрахований радіаційний ризик за даними табл. 2 для пожежного від зовнішнього опромінення та за даними табл. 3 радіаційний ризик від внутрішнього опромінення за рахунок інгаляційного надходження РПЗ до організму пожежного.

Таблиця 4. Розрахунковий радіаційний ризик при зовнішньому R_{int} [10] та внутрішньому R_{inhal} [11] опроміненні РПЗ пожежного різними радіонуклідами

Радіонуклід	Клас всмоктування	Радіаційний ризик	
		R_{int}	R_{inhal}
^{137}Cs	M	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$
^{90}Sr	F	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$
^{238}Pu	M	$0,8 \cdot 10^{-3}$	$8,7 \cdot 10^{-4}$
$^{239,240}\text{Pu}$	M	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$
^{241}Am	F	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$

Висновки. З наведених у табл. 4 даних бачимо, що межа радіаційного ризику для пожежного, який задіяний у гасінні пожежі у Чорнобильській зоні, може перевищувати межу граничного індивідуального радіаційного ризику – 10^{-3} [10], тому необхідно застосувати спеціальні міри і заходи захисту.

З іншого боку, запропонований підхід значно розширює джерела вихідної інформації, придатної для отримання індивідуальних дозових оцінок, особливо при оперативному контролі радіаційного ризику.

Отже, можна розробити необхідні методики, використовуючи результати:

- а) контролю об'ємної концентрації РПЗ або ж величин, прямо пов'язаних з нею;
- б) інтегральної концентрації РПЗ;
- в) активності, що відклалася в легенях та носовій порожнині пожежного.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Азаров С.И., Однолько А.А. Оценка пожарной опасности территорий, загрязнённых радионуклидами / Лесное хозяйство. – 1996. – № 3. – С. 15–16.
2. Азаров С.И. Методика анализа радиационного риска при тушении пожара на территориях, загрязнённых радионуклидами / Пожаровзрывобезопасность. – 2001. – Т. 10, № 1. – 2001. – С. 40–43.
3. Азаров С.И. Разработка аналитических методов расчёта частоты пожаров в пост-чернобыльской зоне / Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков. – XV научно-практическая конференция. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1999. – С. 25–26.
4. Оценка ведущих и дозообразующих факторов внешнего и внутреннего облучения с обеспечением индивидуального группового биофизического контроля: Отчет НИР (заключ.). Ответств. исполнит. А.Г. Цовьянова / Ин-т биофизики МЗ РФ. – Москва – Славутич, 1993–1994. – 60 с.
5. Дозиметрический и радиационный контроль при работе с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений: Метод. рук-во. – Т. 1. Организация и методы контроля. – М.: Атомиздат, 1980. – 272 с.
6. Общие принципы радиационной защиты персонала. (Публикация 75 МКРЗ) / Под ред. А.В. Кружалова. – Екатеринбург: Уралросцентр, 1999. – 56 с.
7. Азаров С.И. Методика расчёта переноса радионуклидов в результате пожаров в Чернобыльской зоне / Радиационная биология. Радиоэкология. – 1988. – Т. 38, Вып. 1. – С. 102–109.
8. ICRP Publication 66. Human respiratory tract model for radiological protection. – Vienna: Pergamon. 1993. – 65 p.
9. ICRP Publication 68. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. Part 2. Ingestion Dose Coefficient. – Vienna: Pergamot Press. 1994. – Vol. 24. – № 4. – 83 p.
10. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) / Державні гігієнічні нормативи. ДГН 6.6.1. – 6.5.001-98. – К., 1998. – 135 с.
11. Health risks from low – level environment exposure to radionuclides. Radionuclide specific lifetime radiogenic cancer risk coefficients for the US population, based on age – dependent intake, dosimetry and risk models: Federal Guidance Report № 13, Part 1. Document ERA 402-R-97-014/ORNI, Car-Ridge US ERA. – Washington DC, 1998. – 421 p.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2015