

В. Г. Батій<sup>1</sup>, А. О. Сізов<sup>1</sup>,  
Д. В. Федорченко<sup>2</sup>, А. О. Холодюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Україна

<sup>2</sup> Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», м. Харків, Україна

## Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта «Укриття»

Проведено аналіз динаміки зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів (ПВМ) та інших радіоактивних відходів з об'єкта «Укриття» з урахуванням системи вентиляції нового безпечного конфайнменту (НБК). Показано, що в разі вилучення за зміну двох контейнерів з ПВМ об'ємом 3 м<sup>3</sup> критерій нормальної експлуатації НБК не перевищуватиметься. В умовах суттєвої інтенсифікації роботи потрібно вживати додаткових заходів протирадіаційного захисту (пилопригнічення тощо).

Ключові слова: радіоактивні відходи, паливовміщуючі матеріали, вилучення, аерозолі, концентрація, об'єкт «Укриття», новий безпечний конфайнмент.

В. Г. Батий, А. А. Сизов, Д. В. Федорченко, А. А. Холодюк

### Динамика изменения концентрации радиоактивных аэрозолей при извлечении топливосодержащих материалов из объекта «Укрытие»

Проведен анализ динамики изменения концентрации радиоактивных аэрозолей при извлечении топливосодержащих материалов (ТСМ) и других радиоактивных отходов из объекта «Укрытие» с учетом системы вентиляции нового безопасного конфайнмента (НБК). Показано, что при извлечении за смену двух контейнеров с ТСМ объемом 3 м<sup>3</sup> критерий нормальной эксплуатации НБК не будет превышен. В условиях существенной интенсификации работы необходимо применять дополнительные меры противорадиационной защиты (пылеподавление и т. п.).

Ключевые слова: радиоактивные отходы, топливосодержащие материалы, извлечение, аэрозоли, концентрация, объект «Укрытие», новый безопасный конфайнмент.

© В. Г. Батій, А. О. Сізов, Д. В. Федорченко, А. О. Холодюк, 2015

Відповідно до вимог законів України [1, 2] та «Стратегії перетворення об'єкта «Укриття»» [3] однією з умов перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему та зняття його з експлуатації є вилучення паливовміщуючих матеріалів (ПВМ), що утворилися внаслідок аварії на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС.

Перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему досягається реалізацією трьох основних етапів [3]:

етап 1 — стабілізація стану існуючого об'єкта; підвищення експлуатаційної надійності й довговічності конструкцій і систем, що забезпечують стабілізацію та контроль показників безпеки об'єкта «Укриття»;

етап 2 — створення додаткових захисних бар'єрів (у першу чергу конфайнменту), що забезпечують необхідні умови для демонтажу нестабільних будівельних конструкцій і технічної діяльності на етапі 3 та безпеку персоналу, населення й довкілля; підготовчі інженерно-технічні роботи, спрямовані на розроблення технологій вилучення з об'єкта «Укриття» ПВМ на етапі 3; створення інфраструктури для поводження з РАВ об'єкта «Укриття»;

етап 3 — вилучення з об'єкта «Укриття» ПВМ та інших довгоіснуючих РАВ, їхнє кондиціонування з подальшим зберіганням і захороненням у сховищах РАВ відповідно до чинних стандартів; зняття з експлуатації об'єкта «Укриття».

Роботи з вилучення ПВМ і супутніх РАВ належать до радіаційно небезпечних, тобто під час їх виконання можливі опромінення персоналу та негативний вплив на навколишнє середовище.

Ціль статті — аналіз процесу вилучення ПВМ з об'єкта «Укриття» з урахуванням системи вентиляції НБК, розрахунок додаткової об'ємної активності в просторі під аркою під час вилучення ПВМ.

**Джерела радіоактивних аерозолів при вилученні ПВМ.** Основним джерелом радіоактивних аерозолів у процесі вилучення ПВМ є викиди пилу під час завантаження контейнерів для транспортування РАВ. У статті розглядається надходження пилу під час завантаження одного контейнера об'ємом 3 м<sup>3</sup> (для контейнера більшого об'єму складно забезпечити необхідний рівень біозахисту з урахуванням характеристик кранів НБК [4]).

Для оцінки інтенсивності надходження активності  $E$ , Бк/год, можна застосувати загальне рівняння [4]

$$E = A \cdot EF, \quad (1)$$

де  $A$  — швидкість надходження радіоактивних аерозолів, кг/год;  $EF$  — середня питома активність аерозолів, Бк/кг. Для розрахунків використовуватимемо консервативну оцінку середньої питомої активності радіоактивних аерозолів  $EF = 1 \cdot 10^8$  Бк/кг.

Щоб визначити швидкість надходження радіоактивних аерозолів, скористаємося співвідношенням для кількості радіоактивного пилу, що піднімається, у кілограмах на 1 т завантажуваних у контейнер матеріалів [4],

$$K = k \cdot 0,016 \frac{\left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3}}{\left(\frac{M}{2}\right)^{1,4}}, \quad (2)$$

де  $k$  — безрозмірний коефіцієнт для врахування розміру частинок пилу;  $U$  — середня швидкість повітряного потоку, м/с;  $M$  — відносна сипуча вологість пилу, %.

Згідно з рекомендаціями, наведеними в [5], у розрахунку бралися такі значення величин:  $k = 0,74$ ;  $U = 2,2$  м/с,  $M = 0,3$  %, за яких отримуємо  $K=0,169$  кг/т.

Кількість пилу, що викидається, визначається співвідношенням

$$m = Km_k = K\rho_M V_k, \quad (3)$$

де  $m_k$  — загальна маса твердих матеріалів у контейнері;  $\rho_M$  — густина твердих матеріалів у контейнері;  $V_k$  — об'єм контейнера.

Швидкість надходження радіоактивних аерозолів

$$A = \frac{m}{t_0} = \frac{K\rho_M V_k}{t_0}, \quad (4)$$

де  $t_0$  — час завантаження контейнера.

Підставивши значення величин, що входять до формули (4), а саме:  $V_k = 3$  м<sup>3</sup>,  $\rho_M = 1,25 \frac{\text{т}}{\text{м}^3}$ ,  $t_0 = 2$  год, одержуємо  $A = 0,316 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$ .

Відповідно, інтенсивність надходження активності під час завантаження контейнера згідно з (1) становить  $E = 3,16 \cdot 10^7 \frac{\text{Бк}}{\text{год}}$ .

**Визначення об'ємної активності під час вилучення ПВМ.** Об'ємна концентрація радіоактивних аерозолів всередині НБК визначається інтенсивністю їх надходження, режимом надходження та потужністю системи вентиляції.

Для подальшого розгляду введемо такі позначення:  $V$  — об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;  $G(t)$  — швидкість надходження активності в повітря, Бк/год;  $B$  — швидкість витяжки, м<sup>3</sup>/год;  $Q(t)$  — активність у приміщенні, Бк.

Зміна активності з часом визначається надходженням активності  $G$  та виносенням активності з потоком повітря.

Оскільки за одиницю часу виноситиметься активність  $\frac{B}{V}Q$ , то можна записати таке диференціальне рівняння для змінення активності з часом:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{B}{V}Q + G(t). \quad (6)$$

Конкретний вигляд функції  $G(t)$  визначається режимом робіт з вилучення ПВМ. У цій статті розглядатимемо такий режим роботи:

інтервал між послідовними завантаженнями контейнерів  $t_0 = 4$  год;

час завантаження одного контейнера  $t_1 = 2$  год;

час транспортування контейнера  $t_T = 2$  год;

за зміну (8 год) завантажуються та транспортуються два контейнери;

періодичність робіт  $T = 24$  год, тобто одна зміна за добу.

Вважатимемо, що викид активності відбувається тільки під час завантаження контейнера, а його інтенсивність  $E$  є сталою. Тоді функцію  $G(t)$  можна записати у вигляді

$$G(t) = g(t) + g(t - t_0), \quad (7)$$

$$g(t) = E \sum_{k=0}^{\infty} [\eta(t - kT) - \eta(t - t_1 - kT)], \quad (8)$$

де  $\eta(t)$  — функція Хевісайда:

$$\eta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0. \end{cases} \quad (9)$$

Функція  $G(t)$  фактично є періодичною послідовністю прямокутних імпульсів (рис. 1).

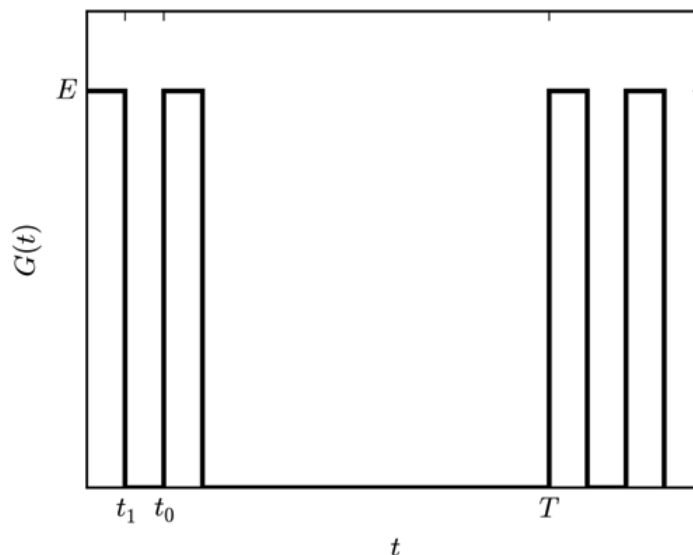


Рис. 1. Графічне представлення функції  $G(t)$

Розв'язок рівняння (6) з функцією  $G(t)$  у вигляді (7) можна знайти методами операційного числення. Відповідний розв'язок рівняння (6) з початковою умовою  $Q(0) = 0$  дається функцією

$$Q(t) = E\tau \sum_{k=0}^{\infty} [q_k(t) + q_k(t - t_0)], \quad (10)$$

де

$$q_k(t) = \left(1 - e^{-\frac{t-kT}{\tau}}\right) \eta(t - kT) - \left(1 - e^{-\frac{t-t_1-kT}{\tau}}\right) \eta(t - t_1 - kT), \quad (11)$$

$$\tau = \frac{V}{B}. \quad (12)$$

Зазначимо, що для кожного фіксованого моменту часу сума в (10) містить скінченну кількість доданків, обмежену значенням  $k_{\max} = \lfloor t/T \rfloor$ , тобто кількістю робочих діб, що минули. Відповідно, кожний доданок у сумі (10) дає внесок від надходження активності потягом попередніх робочих діб.

Співвідношення (10) можна записати у більш зручному для практичного застосування вигляді. Для цього розглядатимемо концентрації аерозолів у повітрі після  $N$  діб роботи в момент часу  $t'$  після початку зміни. В сумі (10) можна виділити окремо внески від попередніх  $N$  діб роботи та поточної доби. Підсумовуючи доданки за формулою геометричної прогресії, одержуємо

$$Q(N, t') = E\tau [\tilde{q}(N, t') + \tilde{q}(N, t - t_0)], \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \tilde{q}(N, t') = & \frac{e^{-\frac{t'}{\tau}} \left( \frac{t_1}{\tau} - 1 \right) \left( 1 - e^{-\frac{NT}{\tau}} \right)}{e^{\frac{t'}{\tau}} - 1} + \\ & + \left[ \left( 1 - e^{-\frac{t'}{\tau}} \right) \eta(t') - \left( 1 - e^{-\frac{t'-t_1}{\tau}} \right) \eta(t' - t_1) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Співвідношення (13) та (14) дають змогу розрахувати вміст аерозолів під час робочої зміни після  $N$  діб роботи.

Перший доданок в (14) описує залишкову активність на початок робочої зміни, тоді як другий відповідає зміненню активності в разі завантаження контейнера протягом поточної робочої зміни. Залишкова активність зростає із зростанням  $N$  і при  $N \gg \tau / T$  досягає максимального значення. Із (13) та (14) знаходимо відповідні значення активності протягом робочої зміни:

$$Q_e(t') = E\tau[\tilde{q}_e(t) + \tilde{q}_e(t - t_0)], \quad (15)$$

$$\tilde{q}_e(t') = \lim_{N \rightarrow \infty} \tilde{q}(N, t') = \frac{e^{-\frac{t'}{\tau}}(e^{\frac{t_1}{\tau}} - 1)}{\frac{T}{e^{\frac{T}{\tau}} - 1}} + \left[ \left(1 - e^{-\frac{t'}{\tau}}\right)\eta(t') - \left(1 - e^{-\frac{t' - t_1}{\tau}}\right)\eta(t' - t_1) \right]. \quad (16)$$

Оскільки максимальна активність протягом зміни спостерігається по завершенню завантаження другого контейнера, тобто при  $t' = t_1 + t_0$ , то із співвідношень (13) та (14) впливає формула для максимальної питомої активності радіоактивних аерозолів під час вилучення ПВМ

$$q_{\max}(N) = \left(1 - e^{-\frac{NT}{\tau}}\right) q_{\max}, \quad (17)$$

$$q_{\max} = \frac{E \left(1 + e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{t_1}{\tau}}\right)}{B \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)}. \quad (18)$$

З останніх рівнянь видно, що максимальна питома активність зростає з часом, і при  $N \gg \tau / T$  сягає максимального значення  $q_{\max}$ .

Для розрахунку інгаляційного надходження радіонуклідів за робочу зміну позначимо  $A_{in}$  — інгаляційна активність, Бк;  $B_{in}$  — швидкість надходження радіонуклідів за рахунок інгаляції, м<sup>3</sup>/с;  $T_s = 8$  год — тривалість робочої

зміни. Швидкість надходження активності до організму за рахунок інгаляції

$$\frac{dA_{in}}{dt} = B_{in} \frac{Q(t')}{V}. \quad (19)$$

У консервативному підході за активність аерозолів під час робочої зміни слід брати максимальні рівноважні значення, які визначаються рівняннями (15) та (16). Тоді

$$A_{in} = \int_0^{T_s} \frac{B_{in}}{V} Q_e(t') dt'. \quad (20)$$

Із співвідношень (15), (16) та (20) одержуємо

$$A_{in} = \frac{B_{in} E}{B} \left[ 2t_1 - \tau \frac{\left(1 + e^{-\frac{t_0}{\tau}}\right) \left(e^{\frac{t_1}{\tau}} - 1\right) \left(e^{\frac{T - T_s}{\tau}} - 1\right)}{e^{\frac{T}{\tau}} - 1} \right]. \quad (21)$$

**Результати та обговорення.** Для НБК об'єм простору під аркою становить  $V = 1376915$  м<sup>3</sup>, а потужність вентиляційної системи  $B = 78000$  м<sup>3</sup>/год. Відповідний характерний час виносу активності  $\tau = 11,65$  год.

На рис. 2, а наведено розрахунковий рівень питомої активності аерозолів після початку робіт. Спади активності пояснюються припиненням роботи між заповненням контейнерів (менші спади) та між змінами (більші спади), тоді як підйоми — послідовним заповненням контейнерів. Із рис. 2, а видно, що концентрація перестає зростати через три-чотири доби після початку роботи. На рис. 2, б наведено залежність концентрації під час робочої доби після досягнення сталих значень. Відповідний розрахунок за формулою (18) дає максимальну питому концентрацію радіоактивних аерозолів у процесі вилучення ПВМ на рівні 105 Бк/м<sup>3</sup>, що в 2 рази менше за критерій нормальної експлуатації НБК (210 Бк/м<sup>3</sup> [6]). Але, якщо врахувати коефіцієнт запасу на проектування ( $K=2$ ) [7],

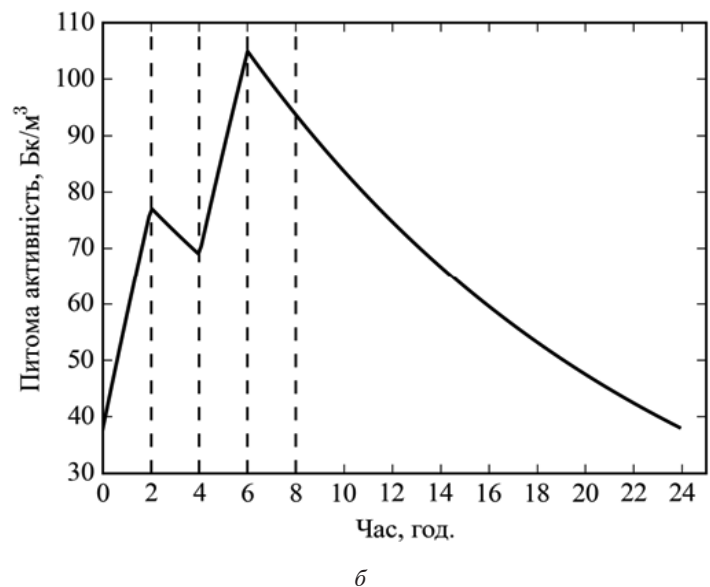
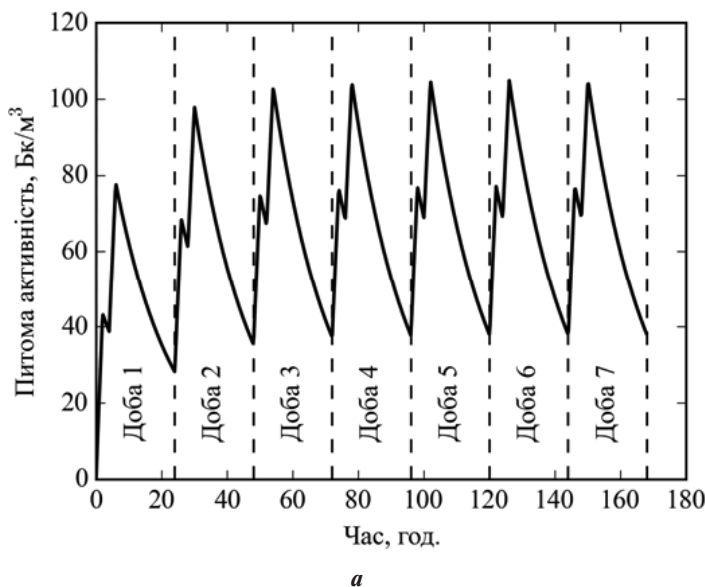


Рис. 2. Розподіл додаткової об'ємної активності в просторі під аркою: а — в результаті послідовного заповнення контейнерів (два контейнера за зміну; завантаження — 2 год, транспортування завантаженого контейнера — 2 год; робота в одну зміну); б — в результаті заповнення двох контейнерів за добу після досягнення сталих значень

роботи в описаному режимі призведуть до концентрацій радіоактивних речовин, близьких до гранично допустимих, а в разі інтенсивніших робіт (наприклад, двозмінна робота) можуть їх навіть перевищити. Отже, під час таких робіт треба використовувати пилопригнічення та проводити постійний моніторинг концентрації радіоактивних аерозолів у повітрі.

## Висновки

За допомогою розробленої методики розрахунку концентрації аерозолів під час проведення робіт, пов'язаних з підйомом пилу всередині будівель, оснащених системами вентиляції, розраховано динаміку зміни концентрації радіоактивних аерозолів у процесі вилученні ПВМ з об'єкта «Укриття». Показано, що концентрація радіоактивних аерозолів не перевищує критерію нормальної роботи НБК в разі заповнення ПВМ двох контейнерів об'ємом 3 м<sup>3</sup> за зміну і перестає зростати через три-чотири доби після початку роботи.

Аналіз показав, що в умовах суттєвої інтенсифікації роботи потрібно застосовувати додаткові заходи протирадіаційного захисту (пилопригнічення тощо).

## Список використаної літератури

1. Закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» / Відомості Верховної Ради України. — 1999. — № 4, ст. 33; № 32, ст. 264.
2. Закон України «Про загальнодержавну програму зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему» / Відомості Верховної Ради України. — 2009. — № 24. — Ст. 300.
3. Стратегія преобразования объекта «Укрытие», принятая решением Межведомственной комиссии по комплексному решению проблем Чернобыльской АЭС, протокол № 2, 2001. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/ru/publish/article/39119>.
4. Принципові технологічні рішення із вилучення паливовміщуючих матеріалів з верхніх відміток об'єкта «Укриття» / Балан О. В., Батій В. Г., Глебкін С. І., Романов Д. М., Підберезний С. С. // Тезиси докладов XIII конференції по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (16–20 марта 2015 г.). — Харьков : ННЦ ХФТИ, 2015. — С. 61.
5. US Environmental Protection Agency (1995), AP 42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Fifth Edition, Vol. 1, available at: <http://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>
6. Документ по безопасности в рамках концепции проекта ПК-1 НБК / SIP-N-LI-22-A500\_-CDS-001-01 Revision 1-Appendix. — 2008. — С. 63.
7. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України // Офіційний вісник України. — 2005. — № 23. — Ст. 1322.

## References

1. Law of Ukraine “On General Principles of Further Operation and Decommissioning of Chornobyl NPP and Transformation of the Destroyed Fourth Unit of this NPP into Ecologically Safe System” [Zakon Ukrainy “Pro zahalni zasady podalshoi ekspluatatsii i zniattia z ekspluatatsii Chornobylskoi AES ta peretvorennia zruinovanohto chetvertoho enerhobloka tsiei AES na ekolohichno bezpechnu system”], Journal of the Verkhovna Rada of Ukraine, 1999, No. 4, p. 33; No. 32, p. 264. (Ukr)
2. Law of Ukraine “On National Program of Decommissioning of Chornobyl NPP and Transformation of the Shelter into Ecologically Safe System” [Zakon Ukrainy “Pro zahalnodержавnu programu zniattia z ekspluatatsii Chornobylskoi AES ta peretvorennia obiekta “Ukryttia” na ekolohichno bezpechnu systemu”], Journal of the Verkhovna Rada of Ukraine, 2009, No. 24, p. 300. (Ukr)
3. The Shelter Transformation Strategy approved by the Decision of the Interdepartmental Commission for a Comprehensive Solution to the Problems of the Chornobyl NPP, Protocol No. 2 [Strategiia preobrazovaniia obiekta “Ukryttie”, priniataia resheniim Mezhevdomstvennoi komissii po kompleksnomu resheniiu problem Chernobylskoi AES, protocol No. 2], 2001, available at: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/ru/publish/article/39119> (Rus)
4. Balan, O. V., Batii, V. G., Hliebkin, S. I., Romanov, D. M., Pidberезnyi, S. S. (2015), “Fundamental Process Decisions on Retrieval of Fuel-Containing Materials from Top Elevations of the Shelter” [Pryntsyповi tekhnolohichni rishennia iz vyluchennia palyvovmishchuiuchykh materialiv z verkhnikh vidmitok obiekta “Ukryttia”], Proceedings of Reports of XIII Conference on High Energy Physics, Nuclear Physics and Accelerators (16–20 March 2015), Kharkiv, NSC KIPT, 61 p. (Ukr)
5. US Environmental Protection Agency (1995), AP 42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Fifth Edition. Vol. 1, available at: <http://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>
6. NSC CS-1 Conceptual Design Safety Document [Dokument po bezopasnosti v ramkakh kontseptsii proekta PK-1 NBK], SIP-N-LI-22-A500\_-CDS-001-01 Revision 1-Appendix, 2008, 63. (Rus)
7. Basic Health and Safety Rules of Radiation Safety in Ukraine [Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennia radioatsiinoi bezpeky Ukrainy], Official Journal of Ukraine, 2005, No. 23, p. 1322. (Ukr)

Отримано 10.06.2015.