

М. О. Клименко¹
 О. О. Лебедь¹
 В. А. Мащенко²

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІКИ АКТИВНОСТІ РАДОНУ В ПРАКТИЧНО ІЗОЛЬОВАНОМУ ПРИМІЩЕННІ

¹Національний університет водного господарства та природокористування;

²Рівненський державний гуманітарний університет

Проаналізовані відомі в науковому співтоваристві моделі ексхаляції та еманування радону з ґрунту та будівельних матеріалів будинків в різноманітних закритих приміщеннях (штольні шахт, тунелі метро, підвали, квартири тощо). Запропонована фізична модель динаміки об'ємної активності радону в практично ізольованому приміщенні, яка описується диференціальним рівнянням першого порядку. Наводяться експериментальні результати дослідження швидкості надходження радону в практично ізольоване приміщення та їх відповідність запропонованій моделі.

Ключові слова: радон, динаміка, приміщення, швидкість надходження, повітря, об'ємна активність, статистичний аналіз, диференціальне рівняння.

Вступ

Створенням математичних моделей процесів еманування та міграції радону в різних середовищах і за різних умов дослідники займалися практично з моменту його відкриття. Це було пов'язано, в першу чергу, з геологічною розвідкою уранових руд у першій половині ХХ ст., а в другу — з усуненням «радонової проблеми» (масового захворювання на рак легенів шахтарів) у глибоких шахтних штольнях та інших різноманітних виробничих та житлових приміщеннях, які знаходяться на певній глибині відносно поверхні ґрунту (метро, бомбосховища, глибокі підвали тощо). Сьогодні розробка математичних моделей надходження радону з ґрунту є особливо важливою й тому, що за численними науковими дослідженнями встановлено: радон є одним з індикаторів сейсмогеодинамічної активності структур континентальної кори. Через це його вивчення може скласти істотний внесок у розуміння закономірностей розвитку новітньої розломної тектоніки і дати значущу інформацію для сейсмічного прогнозу [1].

У сучасному будівництві й експлуатації будинків у зв'язку з нестримним зростанням вартості енергоносіїв на перший план виходять завдання енергозбереження в процесі забезпечення житлових будинків теплом. Припускають, що половина споживаної теплової енергії, яка використовується системами забезпечення мікроклімату в будинках, йде на підігрів повітря, тому застосування тільки вікон малої повітропроникності забезпечить значну економію тепла (не більше 6 кг/м²·год). Але застосування сучасних будівельних технологій, спрямованих на зниження повітрообміну приміщень, створює умови для накопичення радону в повітрі житлових будинків, а значить — до підвищення ризику онкологічних захворювань легенів їх мешканців.

На сучасному етапі розвитку науки серед науковців немає єдиної думки про механізми формування радонових полів у ґрунті, атмосфері, приміщеннях, про параметри, які характеризують радонове поле і підлягають вимірюванню. Одні учені вважають, що основну інформацію про збурювальні об'єкти в геологічних структурах несе об'ємна активність (ОА) в ґрунтового (підґрунтового) і/або атмосферного повітрі, інші — що тільки густина потоку радону (ГПР) через поверхню здатна дати необхідну і достовірну інформацію про джерела радону в глибинних структурах, через які проходить радон і які формують радонові аномалії [2].

Доцільно припустити, що ГПР із ґрунту залежить від двох груп змінних. Перша з них пов'язана з фізико-хімічними характеристиками ґрунту, з яких найсуттєвішими є поверхнева активність (ПА) Радію-226 в ґрунті, коефіцієнти еманування й дифузії. Ці параметри слабо змінюються в межах окремої ділянки забудови (наприклад, під спорудження житлового будинку). Друга група — це параметри, пов'язані з кліматичними і погодними умовами, серед яких найістотніший

вплив на зміну величини ГПР здійснюють температура навколишнього повітря, атмосферний тиск та вологість ґрунту. Ці параметри постійно змінюються в часі [3].

Параметр ГПР чутливий до зміни напружено деформованого стану геосередовища, ніж величина ОА. Вона може бути використана як самостійний або додатковий прогностичний параметр. Одночасне використання двох величин — ОА ґрунтового радону і ГПР з поверхні землі — дозволяє підвищити достовірність прогностичних оцінок динаміки надходження радону в приміщення [4].

Сьогодні більшість моделей процесів еманування та міграції радону в різних середовищах базуються на теорії еманційного методу. Відповідно до такої теорії перенесення радону з пористого однорідного ґрунту до земної поверхні здійснюється за допомогою механізмів дифузії та конвекції [5].

У межах цієї моделі масоперенесення радону в приземний шар атмосфери описується лінійними диференціальними рівняннями або системою диференціальних рівнянь з частковими похідними із початковими й граничними умовами. При цьому масоперенесення радону в ґрунті здійснюється механізмами дифузії та конвекції, а в приземному шарі атмосфери масоперенесення радону здійснюється під дією турбулентної дифузії.

У зв'язку з цим виникає проблема в розробці математичної моделі динаміки активності радону в практично ізольованих приміщеннях. Під такими приміщеннями автори розуміють приміщення з невеликими значеннями коефіцієнта кратності повітрообміну (КПО) $\lambda_V(t) < 5 \text{ год}^{-1}$.

Мета роботи полягає в аналізі відомих математичних моделей динаміки активності радону в приміщеннях, обґрунтуванні запропонованої моделі для практично ізольованих приміщень та експериментальної її перевірки.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання: провести аналіз існуючих моделей переносу радону; розробити та перевірити модель динаміки активності радону в практично ізольованих приміщеннях.

Об'єкт дослідження — процеси переносу радону в практично ізольованих приміщеннях.

Предмет дослідження — показники об'ємної активності радону.

Методи та методики дослідження. У дослідженнях використані загальнонаукові методи (аналіз, синтез), експериментальні методи (вимірювання об'ємної активності радону радіометром «Альфарад Плюс») та математичне моделювання.

Результати дослідження

Аналіз літературних джерел свідчить, що теорія еманування та міграції радону в різних середовищах достатньо не розроблена. Існуючі моделі еманції та есхалії радону базуються на теорії еманційного методу. Згідно з цією теорією перенесення радону з пористого однорідного ґрунту до земної поверхні здійснюється конвективним та дифузійним шляхом [5].

Такий підхід до побудови і дослідження математичних моделей процесів переносу радону застосовувався в роботах Ю. П. Булашевича, В. І. Уткіна, Г. Ф. Новікова, А. Г. Граммакова, І. М. Хайковича, І. В. Павлова, Л. А. Гулабянца, А. К. Юркова, Д. Ю. Демежко, В. А. Щапова, І. А. Козлової, Е. Н. Рибаківа, В. С. Яковлевої, Н. К. Рижаківа, Р. І. Паровіка, А. В. Клімшина, Т. Kohl, G. Etiope, M. Jiranek, I. Cozmuta, W. J. Speelman, M. Goto, M. Antonopoulos-Domis, S. Savovic, A. Varchegy, I. Suaro тощо.

Так, наприклад, у роботі [6] А. В. Клімшин запропонував модель перенесення радону в умовах промерзання поверхневого шару ґрунтів на основі рівняння дифузії еманції в пористому середовищі. У роботі [7] цього ж автора для математичної моделі накопичення радону в підземних гірничих виробітках (яку можна застосувати і для досліджуваного нами випадку) запропонована система дифузійно-конвективних диференціальних рівнянь. Якщо розглянути гірничу виробітку шахти у вигляді горизонтально розміщеного циліндра, уздовж основ якого спрямований потік вентиляційного повітря від лівої до правої основи, а з бокової поверхні циліндра в приміщення дифундує радон, то динаміку накопичення радону в шахті можна описати за допомогою системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial O\tilde{A}_V}{\partial t} = -\lambda O\tilde{A}_{II} - \lambda_V (O\tilde{A}_{II} - O\tilde{A}_I) + \frac{\tilde{j}S_0}{V}; \\ \eta \frac{\partial \tilde{j}}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) - C\lambda\eta + A_{Ra}K_{em}\rho\lambda, \end{cases} \quad (1)$$

де $O\tilde{A}_V$ — середня за об'ємом циліндра V ОА радону, $\text{Бк}/\text{м}^3$; $O\tilde{A}_{II}$ і $O\tilde{A}_I$ — середні за відповідними

поверхнями основ циліндра OA радону, $Bк/м^3$, ($O\tilde{A}_V = O\tilde{A}_H$); λ — стала розпаду Радону-222, c^{-1} ; λ_V — стала кратності повітрообміну, c^{-1} ; \tilde{j} — середнє за боковою поверхнею циліндра значення густини дифузійного потоку радону, $Bк/(м^2 \cdot c)$; S_6 — площа бічної поверхні циліндра, $м^2$; C — OA радону в пористому середовищі бічної поверхні циліндра, $Bк/м^3$; D — коефіцієнт дифузії радону з бічної поверхні циліндра, $м^2/c$; η — її коефіцієнт пористості; A_{Ra} — ПА Радію-226 в ґрунтах, $Bк/кг$; K_{em} — коефіцієнт еманування радону з бічної поверхні; ρ — густина ґрунтів, $кг/м^3$, r — радіус циліндра, $м$.

Система рівнянь (1) доповнена початковими та граничними умовами, які мають вигляд

$$O\tilde{A}_V(t=0) = C(r); \quad O\tilde{A}_H(t=0) = OA_0; \quad \frac{\partial O\tilde{A}_V}{\partial t}(r \rightarrow \infty) = 0; \quad C(r=r_0) = O\tilde{A}_H;$$

$$\frac{\partial OA}{\partial r}(r=r_0) = \frac{\partial C}{\partial r}(r=r_0).$$

На думку авторів недоліком цієї моделі для застосування її до людського житла є те, що у системі рівнянь (1) залежністю об'ємної активності радону в породі C від координати z знехтували, оскільки передбачається, що ПА радію в ґрунтах, їх густина і пористість, коефіцієнти еманування і дифузії радону розподілені рівномірно в гірських породах, чого не можна стверджувати для житла людини, де ГПР для різних поверхонь (підлога, стіни, стеля тощо) та відповідні фізичні характеристики суттєво відрізняються. Крім того, для житла людини ніколи не буває напрямленої вентиляції повітря, на відміну від шахти.

У роботі Л. А. Гулабянца і Б. Ю. Заболотського [8] визначається потужність (товщина) поверхневих шарів ґрунту, які визначають інтенсивність надходження радону з поверхні ґрунту («активних» шарів). Для цього пропонується рівняння стаціонарного одновимірного дифузійного перенесення радону в однорідному ґрунті з рівномірно розподіленою за об'ємом концентрацією радію.

У роботі В. С. Яковлевої [9] пропонуються моделі переносу радону для стаціонарного випадку в однорідному пористому середовищі з постійними коефіцієнтами і в шаруватому геологічному середовищі з непостійними коефіцієнтами, а також їх числові розв'язки з використанням методу скінчених елементів й інтегро-інтерполяційного методу (методу балансу).

У роботах М. Goto [10] і А. Varchegyі [11] досліджується одновимірна дифузійна модель ексхалляції радону в однорідному пористому середовищі.

У роботі М. Antonopoulos-Domis [12] наводяться одновимірні стаціонарні дифузійно-адвективні моделі у випадку одношарового і двошарового середовищ, а також наведені їх аналітичні розв'язки.

У роботі S. Savovic [13] розглядається нестаціонарна одновимірна дифузійна модель перенесення радону в системі «ґрунт—атмосфера». Для вирішення поставленого завдання автором застосовується метод кінцевих різниць.

У приміщенні в основному радон потрапляє з ґрунту під будинком і з будівельних матеріалів міграцією порами, тріщинами і повітряними порожнинами. Сумарна швидкість надходження радону S_0 у приміщення в певний момент часу зумовлена наявністю градієнта концентрації радону в середовищі і градієнта тиску. У першому випадку формується процес дифузійного перенесення, який характеризується швидкістю S_D , у другому — конвективного (перенесення газу в газі) або фільтраційного (перенесення газу в пористому середовищі), який характеризується швидкістю S_C

$$S = S_D + S_C, \quad (2)$$

де S_D і S_C — відповідно, швидкості дифузійного й конвективного надходження радону в приміщення, $Bк/(м^3 \cdot год)$.

Дифузійний механізм надходження радону детально розглянуто в роботах Е. М. Крисюка [14], Л. А. Гулабянца [15], М. В. Жуковського [16]. За умови відсутності в ґрунтовій основі і захисних конструкціях будинку наскрізних тріщин і швів, а також елементів з великими повітряними порожнинами дифузійне перенесення радону є основним.

Для опису швидкості дифузійного надходження радону S_D використовують густину потоку радону (швидкість ексхалляції радону) q

$$S_D = \frac{\sum q_i \Pi_i}{V}, \quad (3)$$

де q_i — швидкість ексхаляції радону з i -ї поверхні, Бк/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$), площа якої Π_i , м^2 ; V — об'єм приміщення.

Швидкість ексхаляції радону пов'язана безпосередньо з питомою активністю Радію-226 у будівельному матеріалі

$$q = C_{Ra} \rho E \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} D_e}{\varepsilon}} \operatorname{th} \left(d \sqrt{\frac{\lambda_{Rn} \varepsilon}{D_e}} \right), \quad (4)$$

де C_{Ra} — питома активність Радію-226 у матеріалі шару, Бк/кг; ρ — густина матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$; E — коефіцієнт еманування радону; D_e — коефіцієнт дифузії в матеріалі шару, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$; ε — пористість матеріалу; d — половина товщини шару матеріалу, м.

У доповідях НКДАР ООН [17] зазначається, що конвективну складову надходження радону не можна прямо оцінити. В окремих досліджуваних приміщеннях вона була максимально пригнічена застосуванням тріщиностійких вузлів та конструкцій, герметизацією основних шляхів надходження радону. Конвективна складова може бути визначена тільки побічно, на основі різниці величини сумарного надходження радону і його дифузійної складової.

Відомо, що миттєві значення об'ємної активності радону в конкретному приміщенні можуть змінюватися протягом доби в десятки разів. Середньодобові значення ОА радону змінюються протягом місяця і року в меншому діапазоні — у декілька разів. У багатьох роботах, наприклад [18], зазначають, що ОА радону підпорядкована добовим і сезонним циклічним варіаціям із максимумом у ранкові години до сходу сонця і в зимовий час, мінімумом — в післяполудневі години та влітку. Проведені нами експериментальні вимірювання для міста Рівне в цілому підтверджують цей факт. На рис. 1 (для усереднення за 5 точками) показані типові результати вимірювання ОА радону в кімнаті трикімнатної квартири на першому поверсі цегляного будинку («хрущовка») протягом доби.

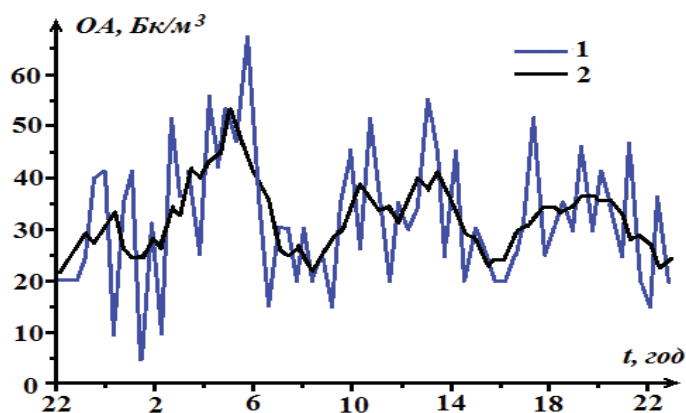


Рис. 1. Динаміка ОА радону в повітрі приміщення (квартира, перший поверх) протягом доби: 1 — значення ОА; 2 — середні значення ОА за п'ятьма точками

За добу в цій квартирі величина ОА радону змінюється в 12 разів із трьома максимумами: першим — від 3 до 6 години ранку (значним), другим — від 10 до 15 години дня (меншим за амплітудою) і третім — від 17 до 22 години. Між ними спостерігаються значні мінімуми. Середнє геометричне значення ОА в приміщенні за час вимірювання становило — $29,35 \text{ Бк}/\text{м}^3$, середнє арифметичне — $32,11 \text{ Бк}/\text{м}^3$ за середньоквадратичного відхилення — $12,6 \text{ Бк}/\text{м}^3$.

За результатами статистичної обробки визначені густина розподілу ймовірності та інтегральна ймовірність значень ОА ізотопів Радону-222 в повітрі досліджуваного приміщення. Отримані результати на основі нормального закону розподілу перевірені за допомогою критерію χ^2 . Статистичний аналіз наявних даних показує, що динаміка об'ємної активності радону в повітрі такого приміщення описується нормальним законом розподілу. Це пояснюється тим, що концентрація радону залежить від багатьох чинників: густини потоку радону з поверхні ґрунту і вентиляції в приміщенні, які у свою чергу залежать від кліматичних параметрів — температурного режиму, атмосферного тиску, особливостей ґрунту тощо.

Тимчасова залежність концентрації радону $OA(t)$ в приміщенні може бути подана у вигляді диференціального рівняння першого порядку (передбачається, що радон перемішується миттєво у всьому об'ємі приміщення) [18] з початковою умовою $OA(t_0) = OA_{Rn}^{\text{атм}}$

$$\frac{dOA(t)}{dt} = S(t) - \left((OA(t) - OA_{Rn}^{atm}) (\lambda_V(t) + \lambda_{Rn}) \right), \quad (5)$$

де функція $S(t)$ описує сумарне (дифузійне і конвективне) питоме надходження радону в одиничний об'єм приміщення, Бк/(м³·год); $\lambda_V(t)$ — функція, що описує залежність коефіцієнта кратності повітрообміну (КПО) від часу, год⁻¹; $\lambda_{Rn} = 0,00755$ год⁻¹ — стала розпаду Радону-222; OA_{Rn}^{atm} — концентрація радону в зовнішньому повітрі, Бк/м³.

Перевірка цієї математичної моделі проводилася за допомогою експериментальних результатів, отриманих на приладі «Альфарад Плюс» і поданих на рис. 1. Перевагою наших досліджень перед аналогічними була можливість безпосереднього вимірювання ГПР за допомогою радонометра, завдяки чому не потрібно було визначати значення q за допомогою формули (4), що у більшості аналізованих наукових робіт є проблематичним.

У досліджуваному приміщенні об'ємом $V = 26,77$ м² дві стіни були цегляними (одна — з вікном у пластиковій рамі), капітальними, товщиною близько 50 см, інші дві — міжкімнатні, з гіпсобетону, товщиною до 10 см. Підлога й стеля — бетонні перекриття. Середня швидкість надходження радону з цегляних стін становила $q_1 \cdot P_1 = 129,607$ мБк/с і $q_2 \cdot P_2 = 77,366$ мБк/с, з гіпсобетонних — $q_3 \cdot P_3 = 55,341$ мБк/с і $q_4 \cdot P_4 = 34,712$ мБк/с, з підлоги — $q_5 \cdot P_5 = 267,411$ мБк/с, зі стелі — $q_6 \cdot P_6 = 141,915$ мБк/с, де $P_1 \dots P_6$ — площі стін, стелі та підлоги.

Згідно з (2) швидкість дифузійного надходження (ексхаляції) радону S_D в зазначене приміщення становить

$$S_D = \frac{\sum q_i P_i}{V} = \frac{706,4}{26,77} = 26,388 \frac{\text{мБк}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} = 95 \frac{\text{Бк}}{\text{м}^3 \cdot \text{год}}. \quad (6)$$

На рис. 2 подано значення $\lambda_V(t)$ згідно з розрахунками. Середнє арифметичне значення становить $\lambda_V(t)_{\text{сеп}} = 3,49$ год⁻¹.

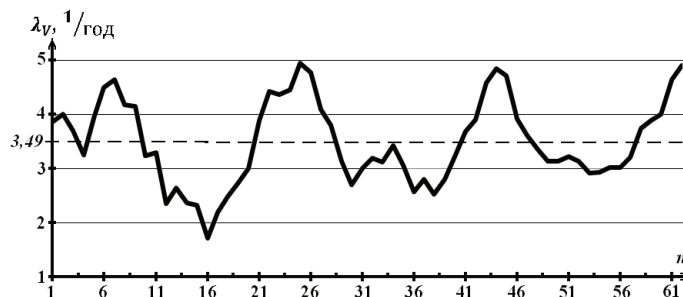


Рис. 2. Розрахунок $\lambda_V(t)$ для досліджуваного приміщення протягом доби (1 n = 20 хв):

----- — середнє значення λ_V

Нехай $\lambda_V(t) = \lambda_V(t)_{\text{сеп}} = 3,49$ год⁻¹ = const, що відповідає стаціонарному режиму експлуатації приміщення з урахуванням при цьому сумарного питомого надходження радону в одиничний об'єм приміщення $S(t) = S_0 = \text{const}$.

Враховуючи, що завжди протягом дослідження $\lambda_V(t) \gg \lambda_{Rn}$, розв'язок рівняння (5) для динаміки ОА радону може бути записаний у вигляді

$$OA(t) = \frac{S_0}{\lambda_V(t)_{\text{сеп}}} + OA_{Rn}^{atm} - \frac{S_0}{\lambda_V(t)_{\text{сеп}}} \cdot e^{-\lambda_V(t)_{\text{сеп}} \cdot (t-t_0)}. \quad (7)$$

Для визначення збігу теоретичної залежності $OA(t)_{\text{теор}}$ із $OA(t)_{\text{експ}}$ для приміщення на першому поверсі проведені розрахунки динаміки величин S , S_C та S_D , показані на рис. 3 в зручних одиницях

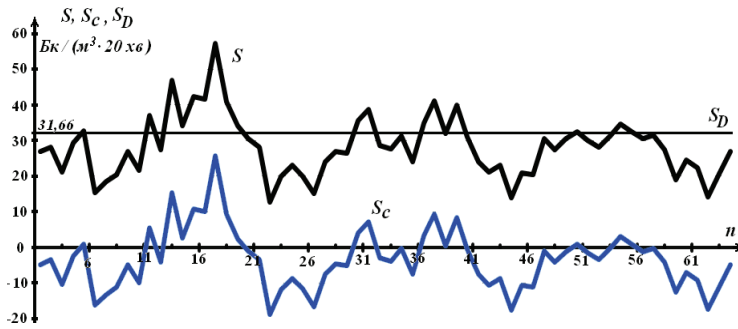


Рис. 3. Залежність приведених S , S_D та S_C від часу для досліджуваного приміщення

$\text{Бк}/(\text{м}^3 \cdot 20 \text{ хв})$, оскільки радонometr робить вимірювання через кожних 20 хв (n — кількість вимірювань).

З рис. 3 видно, що значення конвективного надходження радону S_C можуть бути як додатними (радон надходить у приміщення), так і від'ємними (радон видаляється з приміщення). За рахунок конвекції у приміщення у вимірюваний період радон в основному надходив уночі з 2 до 6 ранку, і невелика його кількість — в обідній час та

ввечері. Ми вважаємо, що в нічний час, коли відсутній інтенсивний рух транспорту та людей, атмосферне перемішування мінімальне і встановлюється температурна інверсія, яка спостерігалася на час вимірювань (8—9.02.2016), Радон-222, подібно до інших газів, накопичувався в приземному шарі землі, досягаючи свого максимуму в передранішні години, і надходив у досліджувану квартиру (з другої до шостої години).

Зі сходом сонця, за зростання інтенсивності руху людей і машин, турбулентне перемішування приземного шару атмосфери підсилюється, що приводить до підйому і поступового руйнування інверсії та, відповідно, зниження концентрації ^{222}Rn в приземному шарі. Наслідком цього процесу є припинення надходження радону в приміщення і зростання витоку радону з квартири назовні.

Незначне зростання надходження радону в кімнату вдень та ввечері, імовірно, пояснюється інтенсивним виходом радону з побутового газу й води з кухні та ванної кімнати, пов'язаного з приготуванням їжі та гігієнічними процедурами.

На другому етапі були проведені розрахунки $OA(t)_{\text{теор}}$ та перевірка їх збігу з $OA(t)_{\text{експ}}$. Результати показані на рис. 4.

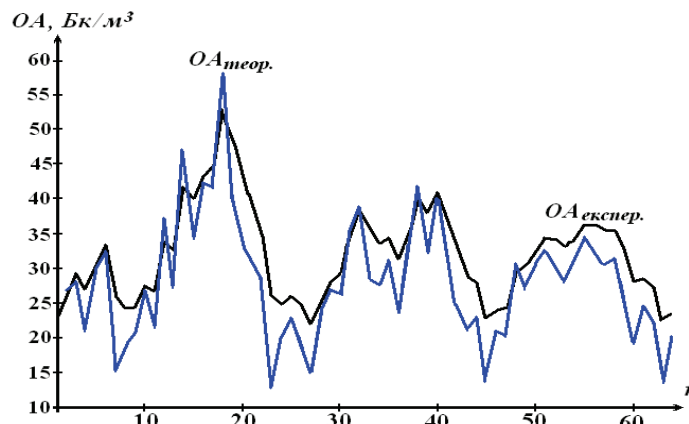


Рис. 4. Динаміка OA радону в повітрі приміщення (квартира, перший поверх) протягом доби

Отримані результати свідчать, що запропонована математична модель динаміки активності радону в приміщенні проста, ефективна і дозволяє розраховувати радонові концентраційні поля в будь-яких закритих приміщеннях.

Висновки

1. За добу в досліджуваній кімнаті трикімнатної квартири, розміщеної на першому поверсі цегляного будинку, значення об'ємної активності радону змінювалось в 12 разів із трьома максимумами: першим — від 3 до 6 години ранку ($50 \text{ Бк}/\text{м}^3$), другим — від 10 до 15 години дня ($40 \text{ Бк}/\text{м}^3$) і третім — від 17 до 22 години ($35 \text{ Бк}/\text{м}^3$).

2. Протягом доби спостерігались як додатні, так і від'ємні значення конвективної складової потоку радону в приміщення, що свідчить про перетік радону як з кімнати назовні, так і навпаки.

3. Динаміка змін об'ємної активності радону в практично ізольованих приміщеннях (підва-

ли, напівпідвали, перші поверхи будинків) може описуватися диференціальним рівнянням першого порядку

$$\frac{dOA(t)}{dt} = S(t) - \left((OA(t) - OA_{Rn}^{atm}) (\lambda_V(t) + \lambda_{Rn}) \right).$$

Спостерігається хороша кореляція між експериментальними даними і результатами розрахунків за запропонованим диференціальним рівнянням.

4. Запропоновану модель разом із експериментальними вимірюваннями корисно застосовувати для визначення «радонової небезпеки» конкретних приміщень з метою зменшення загрози онкологічних захворювань населення, яке в них проживає або здійснює виробничу діяльність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреев А. И. Радон как индикатор сейсмогеодинамической активности / А. И. Андреев, А. А. Коковкин, М. Б. Медвеева // Безопасность в техносфере. — 2011. — № 5. — С. 8—13.
2. Хайкович И. М. Математическое моделирование процессов миграции радона / И. М. Хайкович // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). — 1996. — № 3. — С. 99—107.
3. Роголис В. С. Исследования влияния временных и погодных условий на потоки радона на строительных площадках г. Москвы / В. С. Роголис, С. Г. Кузьмич, О. Г. Подольский // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). — 2001. — № 4 (27). — С. 57—61.
4. Мониторинг напряженно-деформированного состояния массива горных пород на основе наблюдения за радиогенными газами / Г. И. Коршунов, Н. А. Мироненкова, Р. В. Потапов, А. И. Пальцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 6. — С. 197—200.
5. Новиков Г. Ф. Радиоактивные методы разведки / Г. Ф. Новиков, Ю. Н. Капков. — Ленинград : Недра, 1995. — 759 с.
6. Влияние промерзания поверхностного слоя грунтов на перенос радона / А. В. Климшин, И. А. Козлова, Е. Н. Рыбаков, М. Ю. Луковской // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2010. — № 2(16). — С. 146—151.
7. Климшин А. В. Математическая модель накопления радона в подземных горных выработках / А. В. Климшин // Уральский геофизический вестник. — 2010. — № 1 (18). — С. 31—35.
8. Гулябянц Л. А. Мощность «активного» слоя грунта при диффузионном переносе радона в грунтовом основании здания / Л. А. Гулябянц, Б. Ю. Заболотский // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). — 2001. — № 4 (27). — С. 38—40.
9. Яковлева В. С. Диффузионно-адвективный перенос радона в многослойных геологических средах / В. С. Яковлева // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 315, № 2. — С. 67—72.
10. Estimation of global radon exhalation rate distribution / [M. Goto, J. Moriizumi, H. Yamazawa et al.] // The Natural Radiation Environment — 8th International Symposium. — 2008. — V. 1034, No. 1. — P. 169—172.
11. Varchegy A. Radon migration model for covering U mine and ore processing tailings / A. Varchegy, J. Somlai, Z. Sas // Romanian Journal of Physics. — 2013. — V. 58. — P. 298—310.
12. Experimental and theoretical study of radon distribution in soil / M. Antonopoulos-Domis, S. Xanthos, A. Clouvas, D. Alifrangis // Health Physics. — 2009. — V. 97, No. 4. — P. 322—331.
13. Explicit finite difference solution of the diffusion equation describing the flow of radon through soil / S. Savovic, A. Djordjevich, P. Tse, D. Nikezic // Applied Radiation and Isotopes. — 2011. — No 69. — P. 237—240.
14. Крисюк Э. М. Организация и проведение выборочного обследования уровней облучения населения за счет радона в жилых домах / Э. М. Крисюк И. П. Стамат // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). — 1996/97. — № 3 (9). — С. 25—30.
15. Гулябянц Л. А. Пособие по проектированию противорадоновой защиты жилых и общественных зданий / Л. А. Гулябянц. — М. : НО «ФЭН-НАУКА», 2013. — 52 с.
16. Модификация метода накопительной камеры для измерения плотности потока радона с поверхности почвы / М. В. Жуковский, Г. И. Донцов, А. О. Шориков, А. А. Рогатко // Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ). — 1999. — № 3. — С. 9—20.
17. Источники, эффекты и опасность ионизирующей радиации // Доклад НКДАР ООН за 1988 г. — М. : Мир, 1992. — 560 с.
18. Васильев А. В. Радоновая безопасность современных многоэтажных зданий : автореферат дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.23.19 «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства» / А. В. Васильев. — Курск, 2014. — 22 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 30.05.2017

Клименко Микола Олександрович — д-р с.-г. наук, професор, завідувач кафедри екології, e-mail: teutrios@i.ua ;

Лебедь Олександр Олександрович — старший викладач кафедри хімії та фізики, e-mail: lebed739@ukr.net .

Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне;

Мащенко Володимир Андрійович — канд. техн. наук, доцент кафедри фізики.

Рівненський державний гуманітарний університет, Рівне

M. O. Klymenko¹
O. O. Lebed¹
V. A. Mashchenko²

Mathematical Model of Radon Activity Dynamics in Practically Isolated Apartments

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne;

²Rivne State Humanitarian University

There have been analyzed models of radon exhalation and emanation from soil and building materials of the houses into various closed housing spaces (mine drifts, undergrounds, tunnels, basements, apartments etc.) put forward by the scientific collaboration. The physical model of radon volumetric activity dynamics in the practically isolated apartments described by differential equation of order one has been proposed as well. Experimental results of investigation of radon speed getting into practically isolated apartments and their conformity and their compliance with the suggested model have been given.

Keywords: radon, dynamics, apartment, speed getting, air, volumetric activity, statistic analysis, differential equation.

Klymenko Mykola O. — Dr. Sc. (Agricultural), Professor, Head of the Chair of Ecology, e-mail: m.o.klimenko@nuwm.edu.ua ;

Lebed Oleksandr O. — Senior Lecturer of the Chair of Chemistry and Physics, e-mail: lebed739@ukr.net ;

Mashchenko Volodymyr A. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Physics

Н. А. Клименко¹
А. А. Лебедь¹
В. А. Мащенко²

Математическая модель динамики активности радона в практически изолированном помещении

¹ Национальный университет водного хозяйства и природопользования, Ровно;

²Ровенский государственный гуманитарный университет

Проанализированы известные в научном сообществе модели эксхалации и эманации радона в различных закрытых помещениях (штольни шахт, тоннели метро, подвалы, квартиры и т.д.). Предложена физическая модель динамики объемной активности радона в практически изолированном помещении, которая описывается дифференциальным уравнением первого порядка. Приведены экспериментальные результаты исследования скорости поступления радона в практически изолированное помещение и их соответствие предложенной модели.

Ключевые слова: радон, динамика, помещение, скорость поступления, воздух, объемная активность, статистический анализ, дифференциальное уравнение.

Клименко Николай Александрович — д-р с.-х. наук, профессор, заведующий кафедрой экологии, e-mail: m.o.klimenko@nuwm.edu.ua ;

Лебедь Александр Александрович — старший преподаватель кафедры физики и химии, e-mail: lebed739@ukr.net ;

Мащенко Владимир Андреевич — канд. техн. наук, доцент кафедры физики