

УДК 69.699.887.3

доцент **Володимир Ісаєв**,
isaevv5@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9947-7284,
аспірант **Євген Патрашку**,
patrashku07@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4802-2889,
доцентка **Ірина Ковальова**,
kovaleva1102@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0918-1376,
Одеська державна академія будівництва та архітектури

МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ РАДОНУ В ПРИМІЩЕННІ

Анотація: Отримано аналітичні залежності щодо визначення концентрації Радону ^{222}Rn у повітрі приміщень різного призначення, де має місце просочування газу через нещільності або тріщини в огорожувальних конструкціях (бомбосховища, підвальні, напівпідвальні нежитлові та житлові приміщення першого-третього поверхів будівель і споруд). На основі отриманих формул став можливим розрахунок зміни концентрації газу в досліджуваному просторі.

Розроблена математична модель, що використовує чисельне моделювання ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics) підтвердила результати розрахунку за отриманими аналітичними залежностями. На основі рівнянь нерозривності та усереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса "RANS" (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) отримано результати щодо зміни стану повітряного середовища у вентильованому просторі: графік зміни концентрації ^{222}Rn спочатку забрудненого приміщення (500 Бк/м^3) до нормативної величини в часі при надходженні інертного газу до приміщення і роботі системи загальнообмінної вентиляції; масової частки ^{222}Rn у часі по досягненню величини допустимої нормативними документами України; ліній течії ^{222}Rn (Velocity Stream Line). Отримано інженерні формули для розрахунку зниження концентрації ^{222}Rn при роботі системи загальнообмінної вентиляції. Рекомендована схема повітрообміну в приміщеннях з надходженням ^{222}Rn через нещільності або тріщини в підлозі - "подача припливного повітря зверху - видалення витяжного повітря знизу".

Ключові слова: концентрація (^{222}Rn), радіоактивний розпад, радіоактивне забруднення приміщень, припливно-витяжна вентиляція.

Вступ. Радон – це радіоактивний інертний газ без запаху, кольору та смаку. Для забезпечення радонової безпеки необхідні вдосконалені методи розрахунку радіоактивності повітряного середовища [1], що можуть бути створені на основі фізико-математичних моделей процесів виділення радону та його проникнення

в приміщення. Радон небезпечний радіоактивними продуктами свого розпаду. Він утворюється кількома шляхами. Один із найпоширеніших – у процесі природного радіоактивного розпаду урану, що присутній у гірських породах і ґрунтах. Радон єдиний із благородних газів, що не має стабільних і довго живучих ізотопів. Він розчиняється в крові, воді та інших рідинах організму, значно краще розчиняється в жирах, що зумовлює ефективне поглинання його жировими тканинами при надходженні в організм [2]. Радон може проникати в організм навіть через неушкоджену шкіру [3]. Продукти розпаду радону високотоксичні: це короткоживучі ізотопи полонію, вісмуту й свинцю. Саме вони згубно впливають на організм людини.

Радон надходить у підвальні і далі житлові приміщення крізь огорожувальні конструкції з розломів у земній корі, від уранових виробок, шахт, штолень. В Україні найбільша потенційна небезпека від радону існує в межах Українського кристалічного щита, особливо на стиках із сусідніми тектонічними плитами і платформами (рис. 1). Ще один шлях проникнення радону в приміщення – надходження з атмосферним повітрям.

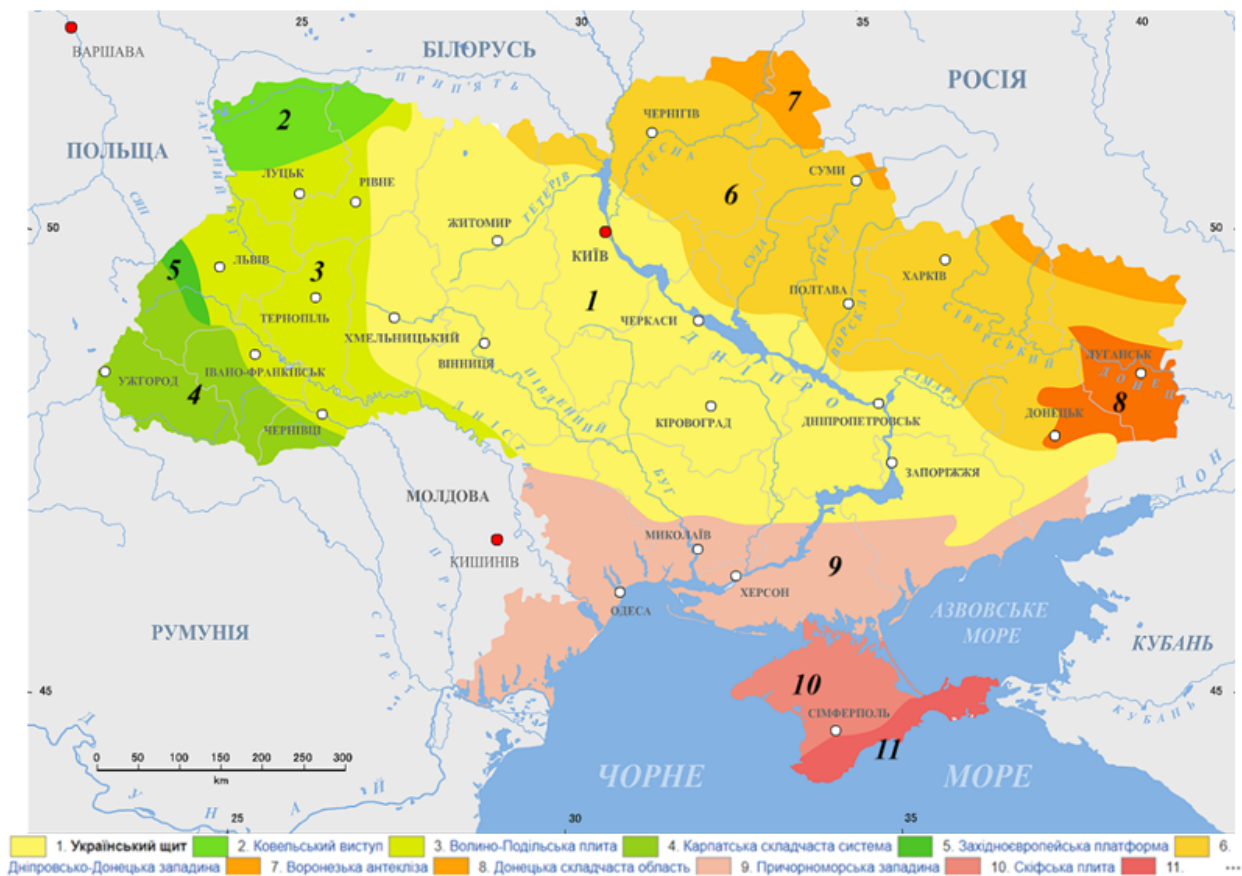


Рис. 1 Тектонічна карта України

Згідно зі звітом ВООЗ, до 14 % усіх захворювань на рак легенів у світі пов'язані з впливом на людину саме цього інертного газу. За концентрації радону в 100 Бк/м^3 у приміщенні, ризик отримати онкологію легенів збільшується до 16 %. [4, 5].

Останні дослідження та публікації. Є численні дослідження поширення радону:

- у питній воді [6, 7];
- природному газі [8];
- ґрунтовому повітрі [9];
- атмосферному повітрі [10];
- у повітрі приміщень житлових і громадських будівель [8, 11].

Поштовхом до вищезазначених досліджень послугували дані, отримані у Швеції в середині минулого століття, щодо високого вмісту радону в житлових будівлях, які не пов'язані з виробничою діяльністю уранових шахт [12].

У зарубіжних країнах рівень радону в повітрі вимірюється в одиницях активності радону (ОА), у пострадянських країнах (Азербайджан, Білорусь, Киргизія, Молдова, Таджикистан, Україна) використовуються показники середньорічної еквівалентної одиниці активності (ЕРОА) ізотопів радону (^{222}Rn , ^{220}Rn) [1].

За оцінками, середній рівень об'ємної активності (ОА) радону в повітрі приміщень у світі становить близько 40 Бк/м^3 , проте в країнах із високим природним радіаційним фоном (Швейцарія, Сербія) цей рівень може в кілька разів перевищувати середньосвітовий [4]. Наприклад, у школах і дитячих садках 20 країн рівень ОА радону варіюється від 17 Бк/м^3 (Саудівська Аравія) до 317 Бк/м^3 (Словаччина) [13]. У період з 2010 по 2020 рік рівень ОА радону в приміщеннях початкових класів різних країн варіювався від 27 до 480 Бк/м^3 , середнє арифметичне значення становило $133,43 \pm 95,14 \text{ Бк/м}^3$, а середнє геометричне – $109,06 \pm 1,87 \text{ Бк/м}^3$ [9].

На території України (Дніпропетровська, Кіровоградська, Житомирська, Вінницька та Черкаська області) відомі аномалії, які в десятки і сотні разів перевищують нормативи для радону в будівлях, будівельних матеріалах і воді. Моніторинг радону в різних областях України виявив, що ці факти не є одиничними. Результати обстеження понад 24 тис. будівель різних типів дали змогу встановити, що в 19 % будівель концентрації радону перевищують 100 Бк/м^3 , а в 0,3 % будівель було зафіксовано концентрації, що перевищують 200 Бк/м^3 . В окремих випадках були зафіксовані концентрації, що перевищують 500 Бк/м^3 [14].

На Українському щиті (див. рис. 1) розташовані Житомирська, Вінницька, Кіровоградська та Запорізька області, східні частини Рівненської та

Хмельницької області, північно-східні частини Одеської, Київської (правобережжя) та Черкаської областей, північні частини Миколаївської, Дніпропетровської (правобережжя) та Черкаської областей. Тому в будівлях цих областей часто спостерігається перевищення нормативів за радоном. Оцінка доз опромінення населення України свідчить про значні варіації радону в приміщеннях будівель [14, 15].

Створення комфортного, безпечного мікроклімату в приміщенні є першочерговим завданням у районах із підвищеною концентрацією ^{222}Rn .

Мета і завдання дослідження. Метою є розроблення методики розрахунку для досягнення:

- зниження радіаційної активності ^{222}Rn у робочій зоні приміщення;
- пропозиція схеми повітрообміну, що виключає можливість надходження радіоактивних ізотопів у зону дихання людини.

Завданням дослідження є створення математичної моделі та інженерного методу прогнозування оцінки зміни концентрації ^{222}Rn у приміщенні.

Основна частина.

Вихідні умови:

- ізольована площа дослідження (рис.2), площею 6 м^2 ;
- параметри повітря в ізольованому просторі:
 - температура повітря: $t=20 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - початковий рівень концентрації ^{222}Rn : 500 Бк/м^3 ;
 - надходження забрудненого повітря з рівнем концентрації ^{222}Rn : 500 Бк/м^3 ;
 - атмосферний тиск: $P_0 = 101325 \text{ Па}$;
- параметри аналізованого повітрообміну:
 - надходження чистого повітря у верхній точці з витратою $120 \text{ м}^3/\text{год}$ з концентрацією ^{222}Rn : 0 Бк/м^3 ;
 - видалення забрудненого повітря в нижній точці з витратою $120 \text{ м}^3/\text{год}$ за умов витісняючої вентиляції;

Моделювання надходжень шкідливих речовин до ізольованого простору представлено у схемі дослідження на рис.2. Із застосуванням обчислювального гідродинамічного комплексу моделювання ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідрогазодинаміка), створено математичну модель, яка імітує надходження ^{222}Rn крізь щілинний зазор конструкції підлоги з системою повітрообміну, що працює, в площині дослідження. Моделювання надходжень ^{222}Rn здійснено в нестационарних умовах з урахуванням роботи вентиляції. Схема організації повітрообміну стандартна для видалення важких газів: подавання повітря з верхньої зони струминами вертикально вниз, видалення з нижньої зони.

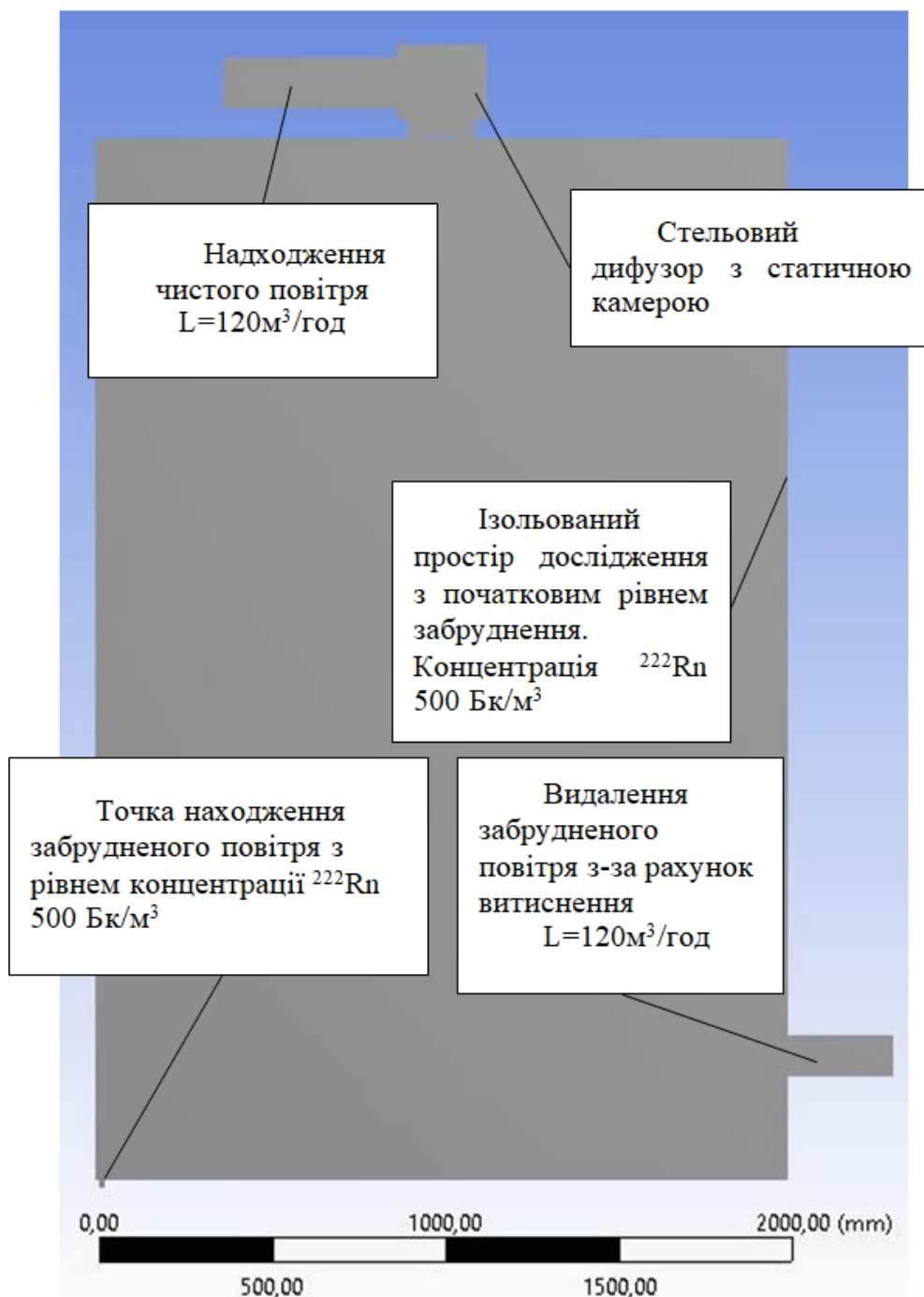


Рис. 2. Схема моделювання надходжень ^{222}Rn та повітрообміну

Насамперед, в ізолюваному просторі (рис. 3) визначено зміну концентрації ^{222}Rn в часі спостереження, при одночасному надходженні концентрації ^{222}Rn 500 Бк/м^3 (масова концентрація $\text{MF}(^{222}\text{Rn})=1.05\cdot 10^{-16}$) у нижній області крізь щілинний зазор конструкції підлоги, а також передбаченій вентиляції.

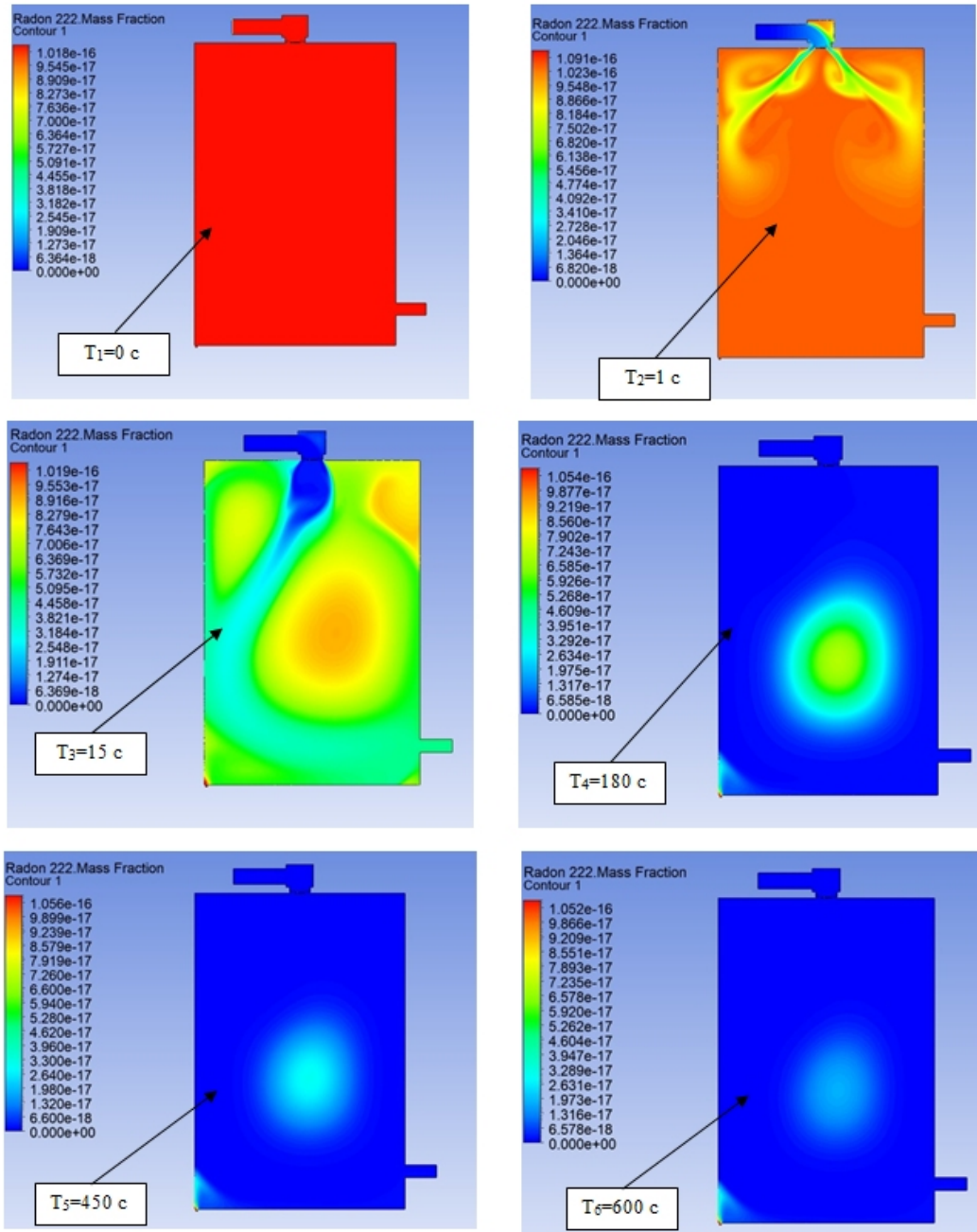


Рис. 3 Моделювання надходжень радону

Графік зміни масової концентрації (Mass fraction) і рівня радіації (Бк/м³) за часом подано на рис. 4. і рис. 5. для точки в робочій зоні на відстані 1,0-1,2 м від рівня підлоги. Для розрахунку концентрації радону $C(t)$ в приміщенні залежно від часу t , використовуємо рівняння балансу маси для радону:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C}{V} + \frac{S}{V} - \lambda \cdot C, \quad (1)$$

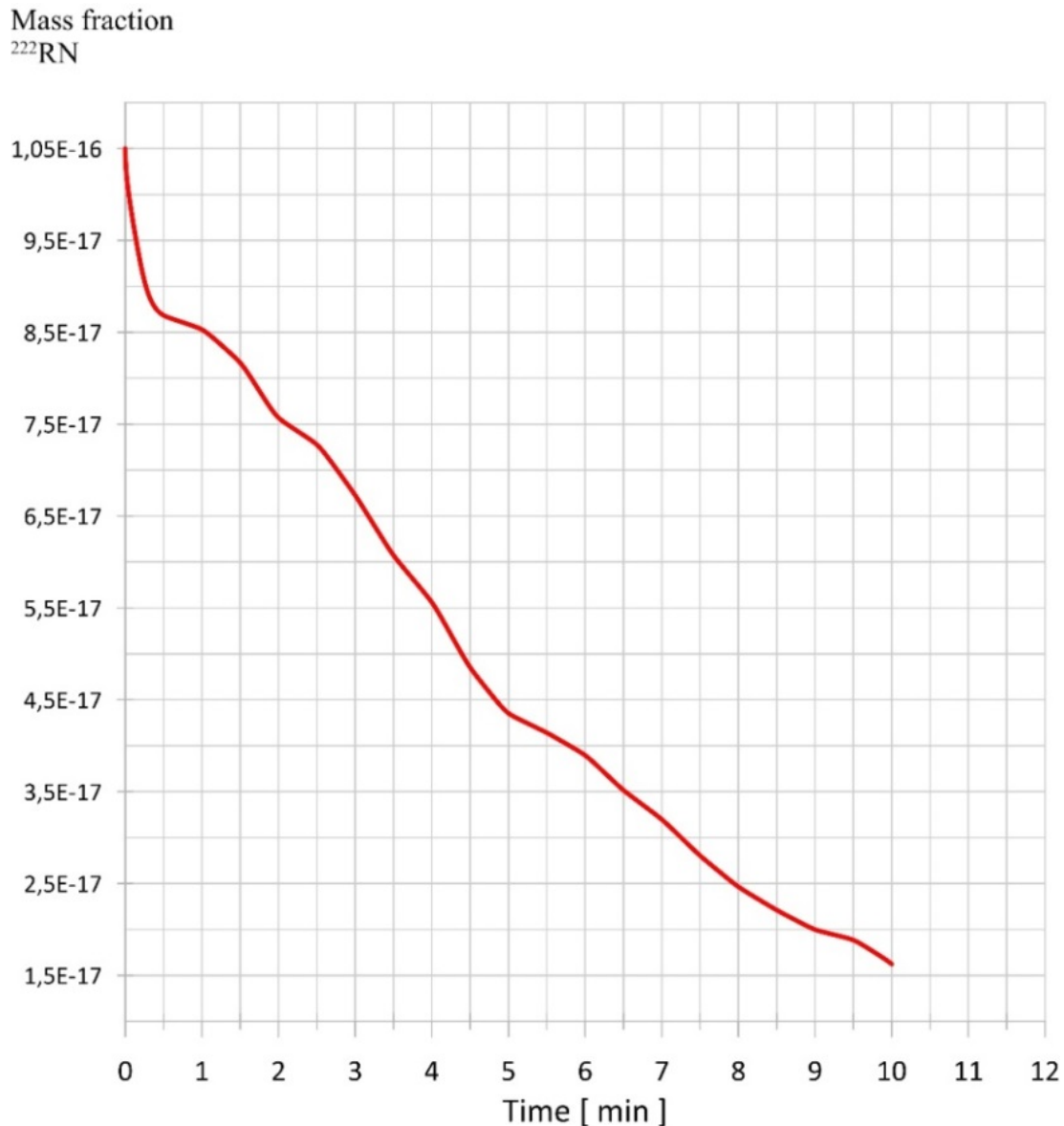


Рис.4 Графік зміни масової концентрації ^{222}Rn за часом

де, згідно з вихідними даними, $C(t)$ – концентрація радону ^{222}Rn у приміщенні (Бк/м³); t – час, год; Q_{in} – приплив повітря, м³/год, у даній роботі $Q_{in}=120$ м³/год; Q_{out} – видалення повітря, м³/год, $Q_{out}=120$ м³/год; C_{in} – концентрація радону ^{222}Rn у припливному повітрі (Бк/м³), у даній роботі $C_{in}=0$ Бк/м³; V – об’єм приміщення, м³, $V=12$ м³; S – швидкість виділення ^{222}Rn у приміщенні (Бк/год), $S=500$ Бк/м³год; $\lambda = \ln(2)/T_{1/2} = 0,007561$ – стала радіоактивного розпаду год⁻¹, $T_{1/2} = 91,68$ год – період напіврозпаду радону. Якщо підставити чисельні значення в (1), отримаємо:

$$\frac{dC(t)}{dt} = -10,00756 \cdot C(t) + 41,67 \quad (2)$$

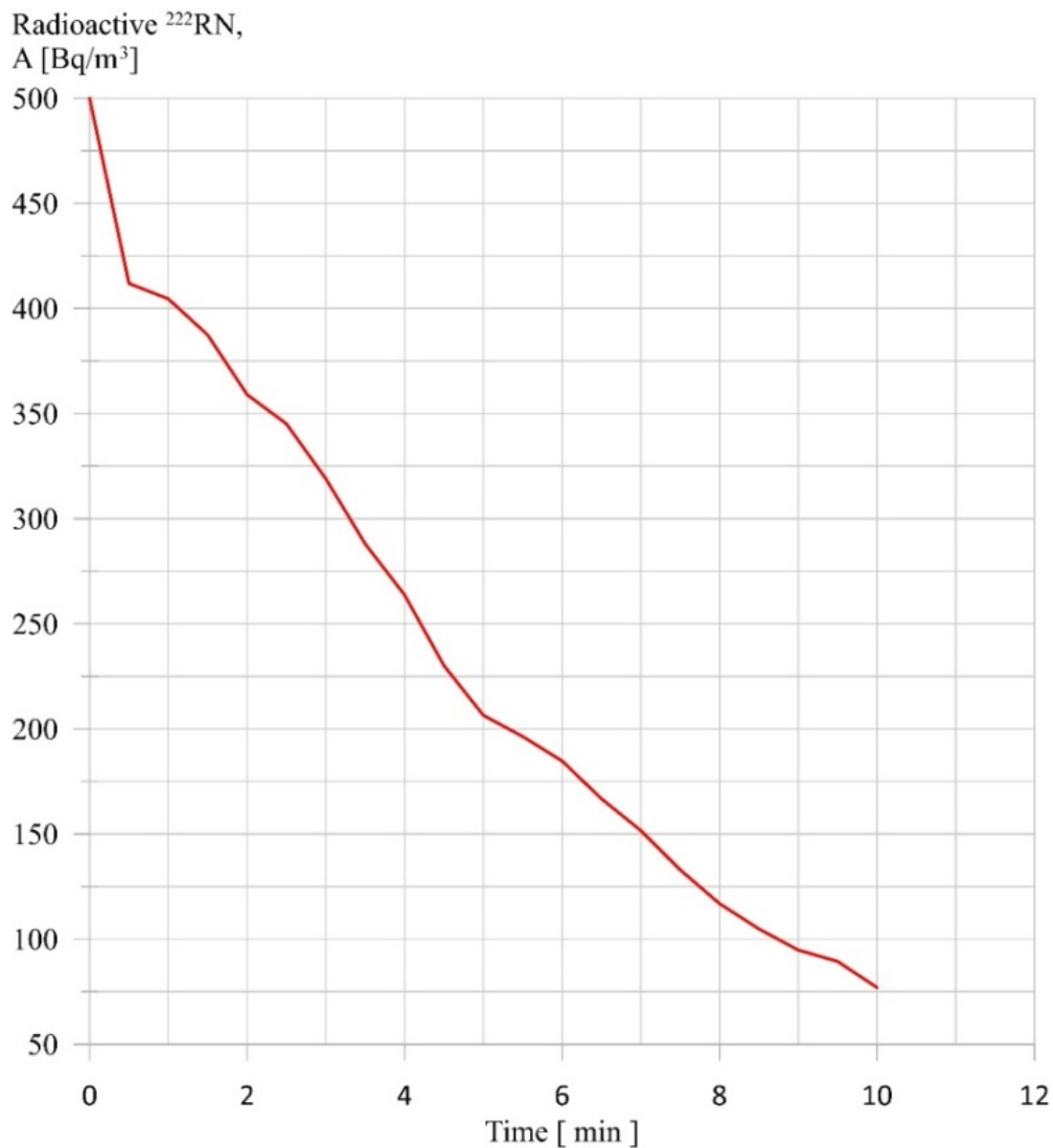


Рис. 5 Графік зміни рівня радіоактивності ^{222}Rn за часом

Рівняння (2) – це лінійне диференціальне рівняння першого порядку. Його розв'язок має вигляд:

$$C(t) = C_{\text{вст}} + (C_0 - C_{\text{вст}}) \cdot e^{-k \cdot t}, \quad (3)$$

де $C_{\text{вст}} = S/(Q + \lambda \cdot V) = 4,163 \text{ Бк/м}^3$ – концентрація радону, що встановилася;
 C_0 – початкова концентрація радону, Бк/м^3 ; $k = (Q/V) + \lambda = 10,00756 \text{ год}^{-1}$ – коефіцієнт.

Порівняльний аналіз концентрації при застосуванні програмного

комплексу ANSYS FLUENT та розв'язку диференціального рівняння балансу маси, який представлено графічно на рис. 6, вказує, що розрахунки набувають майже ідентичних значень.

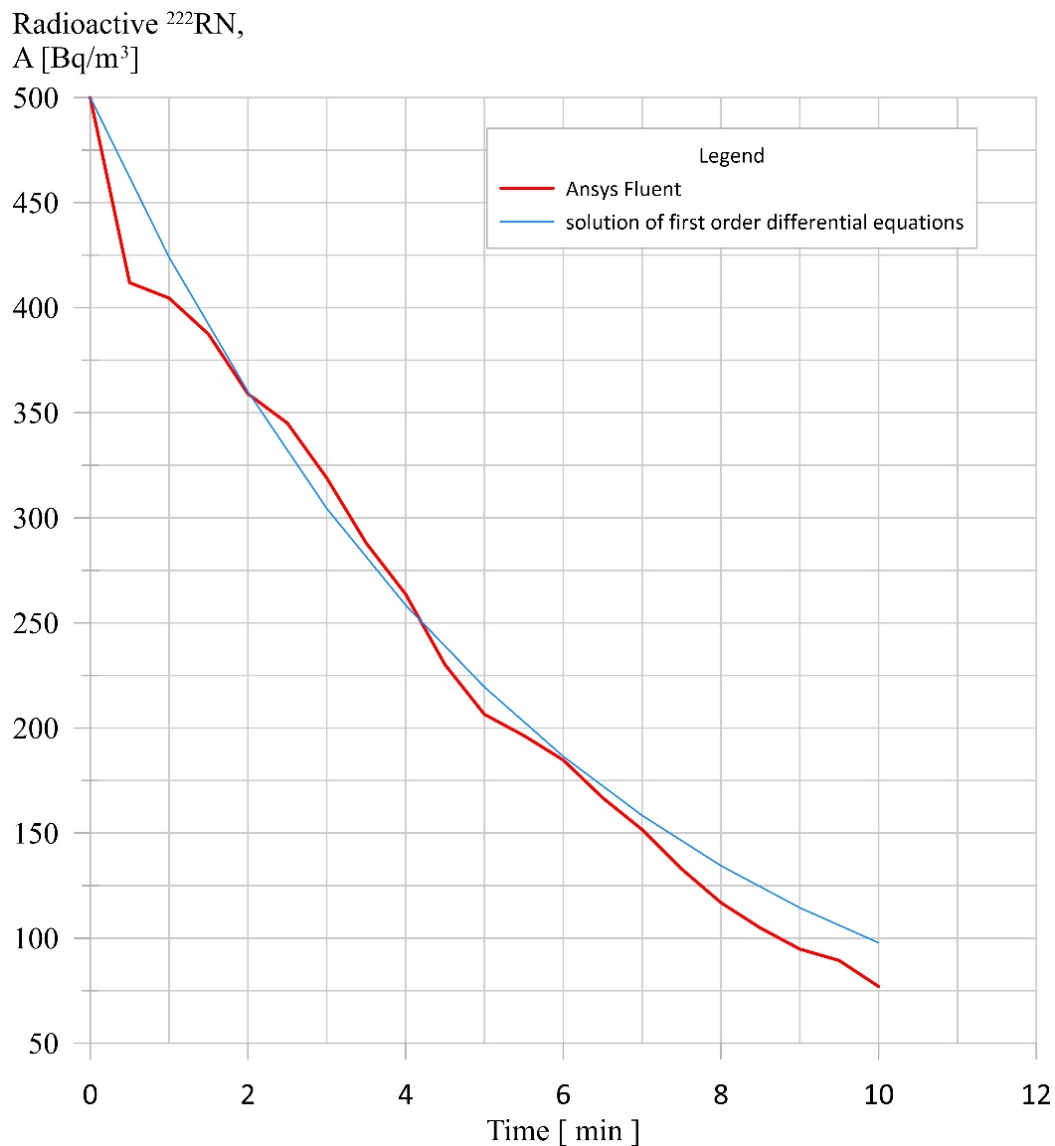


Рис. 6 Результати розрахунків радіоактивності:
червоний – моделювання; блакитний – за рівнянням (3)

Лінії течії при надходженні ^{222}Rn та функціонуванні системи вентиляції набувають вигляду (в площині дослідження X-Y) на рис. 7. Під час розгляду зміни концентрації ^{222}Rn доцільно також розглядати рух повітряного потоку Air Mass Fraction, як домінувального потоку, що залучає до своєї сфери впливу більш дрібні течії (рис.8). Аналіз рис. 3, 7 і 8 однозначно показує доцільність запропонованої схеми організації повітрообміну для приміщень, у які проникає ^{222}Rn . Адже усунуто можливість підняття радону в зону дихання людини.

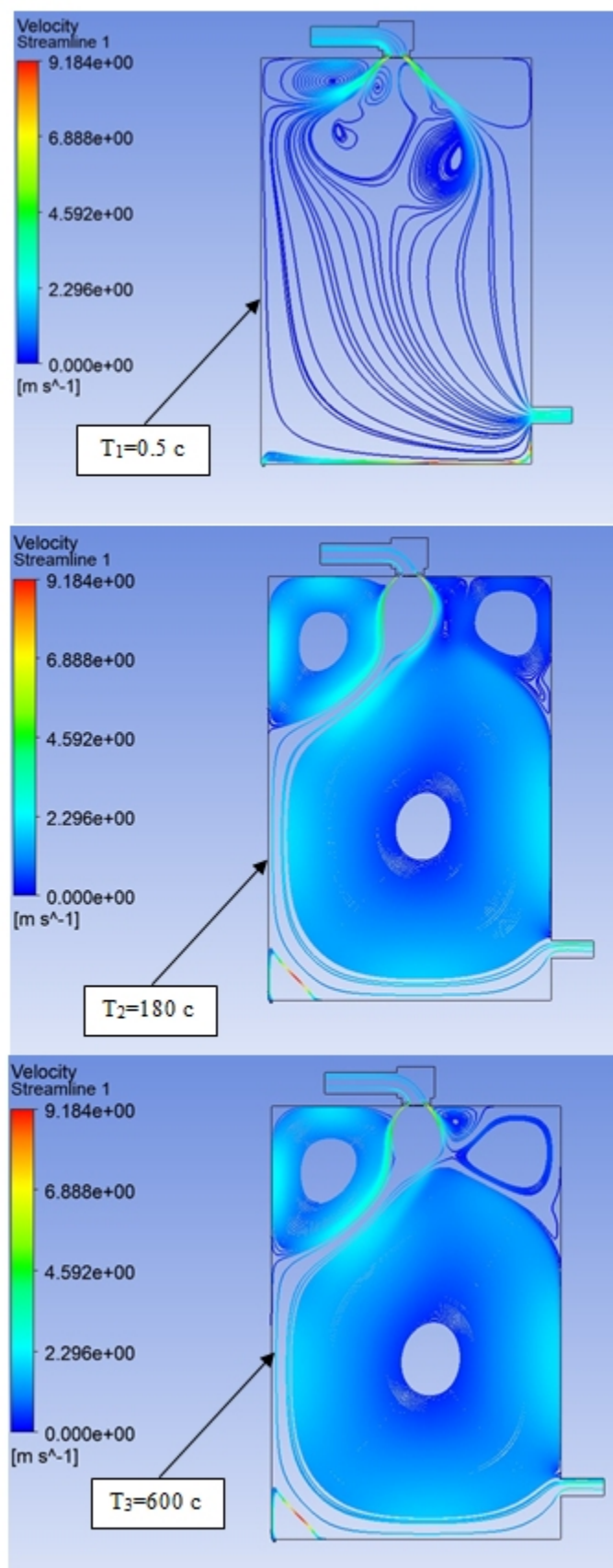


Рис. 7 Формування лінії току

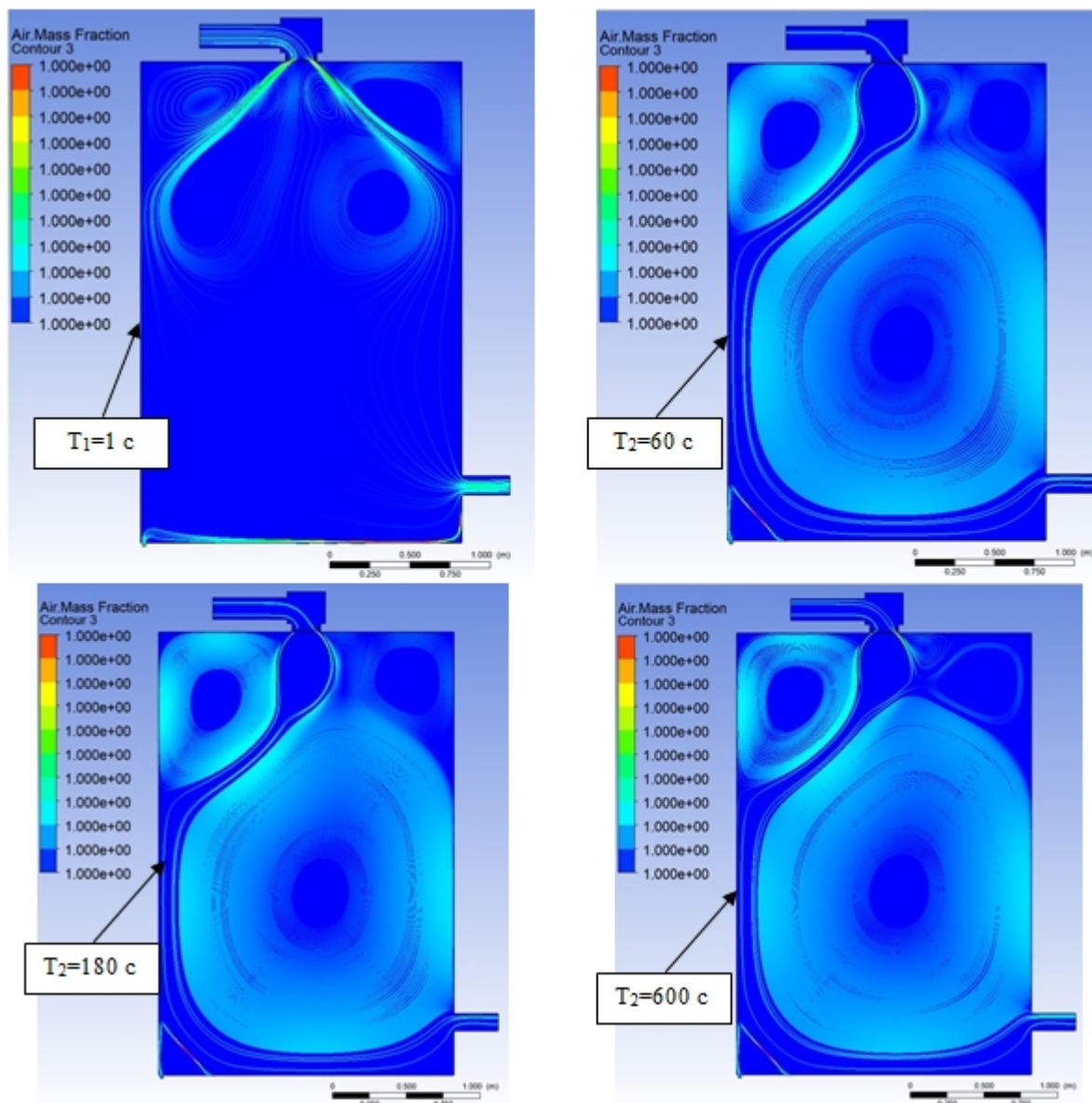


Рис. 8 Моделювання Air Mass Fraction

Висновки. Запропоновано інженерну залежність для розрахунку зміни концентрації ^{222}Rn , що дає добру збіжність результатів з математичною моделлю. Це дає змогу прогнозувати можливість зниження радіоактивного забруднення приміщень, забезпечених вентиляцією.

Збіжність результатів, отриманих розрахунковим шляхом і при використанні математичного моделювання, дає змогу рекомендувати запроповану залежність для практичних розрахунків (див. рис. 6).

Схема повітрообміну "подача припливного повітря зверху - видалення витяжного повітря знизу" усуває можливість контакту легень людини з

радіоактивним газом, і тому рекомендована до впровадження.

References:

1. Pro zakhyst liudyny vid vplyvu ionizuiuchoho vyprominiuvannia. Zakon Ukrainy vid 17.09.2023 №15/98-VR. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80#>.
2. Darby S., Hill D., Doll R. Radon : a likely carcinogen at all exposures // Annals of Oncology Journal. 2001. Vol. 12. No. 10. P. 27.
3. Recalling radon's recognition. Brett F. Thornton and Shawn C. Burdette. NATURE CHEMISTRY VOL 5 SEPTEMBER 2013 www.nature.com/naturechemistry.
4. WHO handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva : WHO Press, 2009. 110 p. ISBN 978-92-4-154767-3.
5. Ionizing radiation: sources and biological effects. UNSCEAR 1982 Report to the General Assembly, with annexes. New York : United Nations, 1982. 773 p. ISBN 92-1-142200-0.
6. Komov I.L., Frolov O.S., Didenko P.I. et al. Methods and Facilities for the Assessment of the Radon-Hazard Potential. Kyiv: Logos. 2004. 416 p.
7. Management of radioactivity in drinking-water. Geneva : WHO Press, 2018. 104 p. ISBN 978-92-4-151374-6.
8. Antignani S., Venoso G., Ampollini M. et al. A 10-year follow-up study of yearly indoor radon measurements in homes, review of other studies and implications on lung cancer risk estimates. Science of The Total Environment. 2021. 762. P.144150. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720376816>.
9. Kaur, M., Kumar, A., Mehra, R., Mishra, R. (2018). Study of radon/thoron exhalation rate, soil-gas radon concentration, and assessment of indoor radon/thoron concentration in Siwalik Himalayas of Jammu & Kashmir. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 24(8). 22752287. doi: 10.1080/10807039.2018.1443793.
10. Celikovic, I., Pantelic, G., Vukanac. I. et al. (2022). Outdoor radon as a tool to estimate radon priority areas - a literature overview. International Journal of Environmental Research and Public Health. 19(2). 662. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/2/662>.
11. Sa, J. P. et al. (2022). Radon in indoor air: towards continuous monitoring. Sustainability. 14(3). 1529. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/3/1529>.
12. Su C., Pan M., Zhang Y. [et al.]. Indoor exposure levels of radon in dwellings, schools, and offices in China from 2000 to 2020: A systematic review.

Indoor Air. 2022. 32(1).P. 12920. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12920>.

13. Kojo, K., Kurtio, P. (2020). Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools -Enforcement of the Radiation Act. International Journal of Environmental Research and Public Health. 17(8). P.2877. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/8/2877>.

14. Komov, I.L., Frolov, O.S., Didenko, P.I. et al. (2005), The main problems of radon safety. Kyiv: Logos – 2005. – 351 c.

15. Pavlenko T., Los I. Exposure doses due to indoor radon-222 in Ukraine and basic directions for the desize // Radiation measurement. – 1997. – V. 28, N 1–6. – P. 733–73.

УДК 69.699.887.3

Associate Professor **Volodymyr Isaev**,
isaevv5@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9947-7284,
Postgraduate student **Evgen Patrashku**,
patrashku07@gmail.com, ORCID: 0009-0008-4802-2889,
Associate Professor **Iryna Kovaleva**,
kovaleva1102@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0918-1376,
Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture

MATHEMATICAL ANALYSIS AND MODELLING OF REDUCING RADON RADIATION ACTIVITY IN THE BUILDING

Abstract: *Analytical dependencies for determining the concentration of Radon 222 (^{222}Rn) in the air of premises for various purposes where gas leaks through leaks or cracks in the building envelope (bomb shelters, basements, semi-basement non-residential and residential premises of the first to third floors of buildings and structures) were obtained. Based on the obtained formulas, it became possible to calculate the change in gas concentration in the investigated space.*

The developed mathematical model, which uses ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, confirmed the results of the calculation according to the analytical dependencies. Based on the continuity equations and the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (RANS), the results of changes in the state of the air environment in a ventilated space were obtained:

- graph of changes in ^{222}Rn concentration in the initially contaminated room (500 Bq/m^3) to the standard value over time when inert gas is supplied to the room and the general exchange ventilation system is in operation;*
- concentration by Mass Fraction for ^{222}Rn in time upon reaching the value*

permitted by the regulatory documents of Ukraine;

- ^{222}Rn current lines (Velocity Stream Line).

The engineering formulas for calculating the reduction of ^{222}Rn concentration during the operation of the general exchange ventilation system were obtained. The recommended scheme of air exchange in rooms with ^{222}Rn inflow through leaks or cracks in the floor is "supply air from above - exhaust air from below".

Keywords: *concentration (^{222}Rn), radioactive decay, radioactive contamination of premises, supply and exhaust ventilation.*