

ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ТА ЗМЕНШЕННЯ РАДОНУ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ ІЗ РАДОНОВМІСНОЇ СИРОВИНИ

Нагурський О.А., Марфутін А.Б.

Інститут сталого розвитку імені В'ячеслава Чорновола

Національного університету «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів

oleg.a.nahursky@lpnu.ua

У статті розглянуто технологічні рішення, спрямовані на мінімізацію радіологічного та екологічного ризику від матеріалів, що містять природні радіонукліди. Головну увагу зосереджено на стратегіях контролю джерел радону, методах попередньої обробки сировини, утриманні радону в структурі матеріалів, архітектурних та інженерно-технологічних засобах захисту. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний експериментально-аналітичний підхід, який поєднує лабораторні вимірювання, порівняльний аналіз і практичну оцінку ефективності технологічних рішень у виробничих умовах. Дослідження проводили на підприємстві, що спеціалізується на виготовленні бетонних виробів – плит, бруківки та бордюрного каменю, які активно застосовуються у житловому та промисловому будівництві. Було відібрано зразки основних складових матеріалів (пісок, цемент, щебінь різних фракцій), визначено їхні радіологічні властивості за допомогою професійного радонного детектора AlphaE (Radon Monitor), а також проведено аналіз питомої активності природних радіонуклідів і потенційного рівня екзальтації радону. Отримані результати дозволили кількісно оцінити вплив фізико-хімічних характеристик сировини, зокрема гранулометричного складу, вологості та пористості, на інтенсивність радоновиділення та ефективність заходів щодо його зниження. Експерименти показали, що поєднання фізико-хімічної обробки сировини (миття, сортування, ущільнення), використання спеціальних домішок для зменшення капілярно-пористої структури, а також впровадження інженерних рішень із вентиляції та герметизації фундаментів дозволяє знизити концентрацію радону у внутрішньому повітрі приміщень на 50–70 %.

Результати підтверджують, що системний підхід до контролю радону забезпечує довготривалу стабільність параметрів радіаційної безпеки, підвищує екологічну надійність продукції та відповідає сучасним вимогам сталого будівництва. Запропонований підхід є практично орієнтованим на потреби будівельної галузі й може бути використаний як основа для розроблення національних рекомендацій, методичних положень і нормативних документів зі зниження радонних ризиків у технологіях виробництва будівельних матеріалів. *Ключові слова:* радон, будівельні матеріали, природні радіонукліди, радіаційна безпека, радонovidілення, екологічний ризик, контроль радону.

Technology of radon control and reduction in the production of building products from radon-containing raw materials.
Nahursky O., Marfutin A.

The article considers technological solutions aimed at minimizing radiological and environmental risks from materials containing natural radionuclides. The main attention is focused on strategies for controlling radon sources, methods of pre-treatment of raw materials, radon retention in the structure of materials, architectural and engineering and technological means of protection. To achieve the set goal, a comprehensive experimental and analytical approach was used, which combines laboratory measurements, comparative analysis and practical assessment of the effectiveness of technological solutions in production conditions. The research was conducted at an enterprise specializing in the manufacture of concrete products – slabs, paving stones and curbstones, which are actively used in residential and industrial construction.

Samples of the main constituent materials (sand, cement, crushed stone of various fractions) were selected, their radiological properties were determined using a professional radon detector AlphaE (Radon Monitor), and an analysis of the specific activity of natural radionuclides and the potential level of radon exaltation was also conducted. The results obtained allowed us to quantitatively assess the influence of the physicochemical characteristics of the raw materials, in particular the grain size distribution, humidity and porosity, on the intensity of radon release and the effectiveness of measures to reduce it. Experiments have shown that the combination of physicochemical processing of raw materials (washing, sorting, compaction), the use of special additives to reduce the capillary-porous structure, as well as the implementation of engineering solutions for ventilation and sealing of foundations allows us to reduce the concentration of radon in the indoor air of premises by 50–70%.

The results confirm that a systematic approach to radon control ensures long-term stability of radiation safety parameters, increases the environmental reliability of products and meets the modern requirements of sustainable construction. The proposed approach is practically oriented to the needs of the construction industry and can be used as a basis for the development of national recommendations, methodological provisions and regulatory documents to reduce radon risks in building materials production technologies. *Key words:* radon, building materials, natural radionuclides, radiation safety, radon release, environmental risk, radon control.

Постановка проблеми. Виробництво будівельних матеріалів із використанням сировини, яка містить природні радіонукліди, створює значну екологічну загрозу через можливе виділення радону –

радіоактивного інертного газу, що негативно впливає на здоров'я людини.

Актуальність дослідження. Радон належить до ключових джерел іонізуючого опромінення людей.

Його концентрація у повітрі житлових та громадських приміщень значною мірою залежить від властивостей будівельних матеріалів. Тому контроль рівня радону є важливим для забезпечення радіаційної та екологічної безпеки в будівництві.

Практичне завдання. Дане дослідження спрямоване на вдосконалення виробничих технологій із врахуванням вимог радіаційної безпеки. Його результати можуть бути використані для розробки національних стандартів і рекомендацій щодо контролю радону в будівництві.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Раніше не до кінця було досліджено вплив фізико-хімічних властивостей матеріалів, методів обробки сировини, а також архітектурно-конструктивних рішень на рівень радоновиділення, що формує необхідність подальшого вивчення цих питань.

Наукова новизна. У роботі запропоновано інтегрований підхід до зниження викидів радону, починаючи від вибору сировини, включаючи процес виробництва виробництво до архітектурного проектування. Такий підхід дозволяє зменшити рівень радоновиділення на 50–70 %. Доведено ефективність комбінованого використання фізичних, хімічних і конструктивних методів захисту.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Раніше увага дослідників зосереджувалася переважно на окремих аспектах природної радіоактивності будівельних матеріалів. Однак недостатньо висвітлювалися практичні технології зменшення радонових ризиків на всіх етапах виробничого процесу, що обумовило актуальність проведення цього дослідження.

Загальнонаукове значення. Розроблений експериментально-аналітичний підхід може слугувати інструментом для оцінювання радонових ризиків, вдосконалення технологій виготовлення будівельних матеріалів і розвитку систем екологічного моніторингу в галузі радіаційної безпеки.

Виклад основного матеріалу. Радон ($Rn-222$) є природним радіоактивним газом, який виникає внаслідок розпаду урану та торію, що знаходяться в земній корі. Невидимий та без запаху, він є одним з основних джерел іонізуючого випромінювання для людини. У сфері будівельної індустрії сировина, така

як магматичні породи, цемент, летюча зола або певні види граніту, може містити різні рівні природних радіонуклідів. Радіоактивність будівельних матеріалів і виробів може призводити до зовнішнього і внутрішнього опромінення людини [1]. Зовнішнє опромінення залежить від активності матеріалу і виникає через опромінювання радіонуклідів ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , які містяться в ньому. Внутрішнє опромінення відбувається через вдихання радону ^{222}Rn і його продуктів розпаду. Перевірка радіологічних властивостей матеріалів і сировини дозволяє визначити рівень природного випромінювання та запобігти накопиченню небезпечних концентрацій радону в приміщеннях, що важливо не лише для користувачів, а й для працівників на підприємствах [4]. Радіоактивність природних будівельних матеріалів залежить від родовища, тому контроль і вибір методів захисту навколишнього середовища мають дві основні цілі: зменшити викиди радону та зберегти якість внутрішнього і зовнішнього середовища.

Джерела та механізми випромінювання радону в матеріалах.

Радон (^{222}Rn) виникає в результаті природного радіоактивного розпаду радію (^{226}Ra). На сьогоднішній день є лише три природні ізотопи. Вони походять з різних природних серій розпаду: ^{219}Rn (розмовно відомий як актинон) походить з серії розпаду актинію (^{235}U), ^{220}Rn (торон) походить з серії розпаду торію (^{232}Th), а ^{222}Rn (радон) походить з ланцюга розпаду ^{238}U , що містяться в різних мінералах земної кори. У таблиці 1 наведено періоди напіврозпаду кожного ізотопу, а також його режим розпаду та енергію [6].

Тому головними джерелами радону в будівельних матеріалах таких як цемент, бетон, глину, граніт, щебінь чи пісок є саме природні радіонукліди [5]. Кількість радону, що виділяється, напряму залежить від вмісту урану і торію в цій сировині – чим вищий їхній рівень, тим більший потенціал радіоактивного газоутворення.

Процес утворення та виходу радону з матеріалу відбувається постійно, але його інтенсивність залежить від низки чинників. Важливу роль відіграє структура матеріалу: чим більше в ньому пор, мікротріщин і каналів, тим легше радон може мігрувати назовні. Температура і вологість також впливають на цей процес при підвищеній температурі газ рухається актив-

Таблиця 1

Деякі ядерні характеристики основних ізотопів радону

Джерело радіаційної родини	Ізотоп	Історична назва	Енергія віддачі 10^3V^*	Енергія розпаду віддачі 10^3V^*	Період напіврозпаду
^{235}U	^{219}Rn	актинон	103	a(6,82)	3,96 s
^{232}Th	^{220}Rn	торон	103	a(6,29)	55,6 s
^{238}U	^{222}Rn	радон	86	a(5,49)	3,82 j

* 1 eV = 1,602 10^{-19} J

ніше, а за надмірної вологості може вивільнятися швидше через розширення мікропор [8].

Крім того, спосіб виробництва та щільність матеріалу мають значення: ущільнені або випалені матеріали з дрібнозернистою структурою значно менше пропускають радон, ніж пористі або слабо ущільнені. Процеси «видиху» газу через мікротріщини та поверхневі дефекти є основним шляхом його виходу в навколишнє середовище.

Отже, інтенсивність випромінювання радону визначається не лише природною радіоактивністю сировини, а й фізичними властивостями самого матеріалу та умовами його експлуатації. Розуміння цих механізмів дає змогу контролювати радоновиділення на етапах виробництва, обробки та використання будівельних виробів, зменшуючи потенційний радіаційний ризик для людини.

Технології зменшення та контролю. Вибір та попередня обробка сировини.

Рівень радону в будівельних матеріалах значною мірою визначається властивостями сировини, з якої вони виробляються. Тому одним із ключових способів зниження радоновиділення є радіологічний аналіз матеріалів, таких як глина, цемент, щебінь або пісок, ще до їх використання у виробництві. Особливу увагу слід приділяти походженню цих матеріалів, оскільки навіть у межах одного родовища рівні природної радіоактивності можуть значно відрізнятися.

Ще на стадії підготовки сировини можна застосовувати технології, спрямовані на скорочення потенціалу радоновиділення. Для пористих матеріалів, наприклад, ефективними є методи ущільнення, які зменшують проникність для радону. Крім того, використання мінеральних домішок або модифікаторів структури допомагає зменшити кількість мікропор, через які газ може виходити назовні. Ще одним дієвим підходом є заміна або часткове виключення сировини з підвищеним урановим чи торієвим складом. Сучасні технології все частіше застосовують методи сортування й фракціонування, що дозволяють видаляти дрібні частинки, які містять найбільші концентрації радіонуклідів. Це не тільки знижує радіаційне навантаження готового матеріалу, а й покращує його фізико-механічні характеристики. Таким чином, ефективне управління рівнем радону починається ще на етапі вибору й обробки сировини.

Утримання та стабілізація радону в матриці.

Радон утворюється в результаті розпаду радію, що природно міститься у мінеральних матеріалах, таких як глини, граніти, цемент тощо. Під час його утворення всередині цих матеріалів радон здатний виходити через мікропори та тріщини. Завдання технологів полягає в тому, щоб зробити структуру матеріалу такою, яка мінімізуватиме цей процес. Одним із основних способів утримання радону є ущільнення структури матеріалу. Якщо основа (матриця), в якій розподілені частинки сировини, має щільну й малопористу структуру, радон залишається всередині,

поступово розпадаючись і не переходячи в повітря. Для досягнення цієї мети у виробництві застосовують спеціальні прийоми, такі як оптимізація температури випалу чи додавання мінеральних і полімерних добавок, здатних зменшувати пористість.

Ще один підхід – це хімічна або структурна фіксація радону, коли створюються умови для зв'язування атомів радію та продуктів його розпаду у стійкі сполуки або їх рівномірного розподілу в матеріалі. Для цього важливо правильно підібрати компоненти. Наприклад, можуть використовуватись матеріали з високими сорбційними властивостями або мікроструктури, здатні ефективно «поглинати» радон [7]. Загалом, утримання та стабілізація радону в матеріалах є не тільки технічним завданням, але й важливим екологічним викликом. Рівень радіаційної безпеки приміщень залежить від того, наскільки результативно матеріал перешкоджає виходу радону. Через це сучасні виробники будівельних матеріалів все частіше впроваджують технології контролю пористості, вологості й складу, забезпечуючи надійність та безпечність продукції протягом усього періоду її експлуатації.

Вентиляція та архітектурне проектування.

Сучасні архітектурні рішення спрямовані на зменшення проникнення радону з ґрунту чи будівельних матеріалів (включно: бруківок, бардюрного каменя і т.і.) у повітря приміщень. Вентиляція, при цьому, відіграє ключову роль. Навіть якщо вживані будівельні матеріали мають певний рівень природної радіоактивності, правильно організований повітрообмін може значно зменшити обсяги радону в повітрі приміщень. Коливання активності радону у приміщенні можна розглянути на малюнку 1 та 2.

Оскільки, радон, це газ, що легко накопичується у закритих приміщеннях, тому ще на етапі проектування варто передбачити систему вентиляції, яка забезпечить постійний приплив свіжого повітря та видалення забрудненого. З метою зменшення радіоактивного проникнення використовують герметичні фундаменти, спеціальні радонозахисні плівки, гідроізоляція та вентиляційні канали під підлогою. Завдяки таким заходам радон виводиться ще до його потрапляння в житлову зону [3]. У житлових і виробничих приміщеннях важливою є не лише природна вентиляція, а й механічна, яка регулює ефективний повітрообмін [6]. Використання систем примусової вентиляції чи рекуперації дозволяє підтримувати оптимальний мікроклімат і значно знижувати рівень радону навіть у регіонах із високим його природним рівнем.

Таким чином, ретельно продумане архітектурне проектування та ефективна система вентиляції є не лише питанням комфорту чи енергоефективності, але й важливою складовою захисту людини від радіаційного впливу.

Результати експериментів та тематичні дослідження.

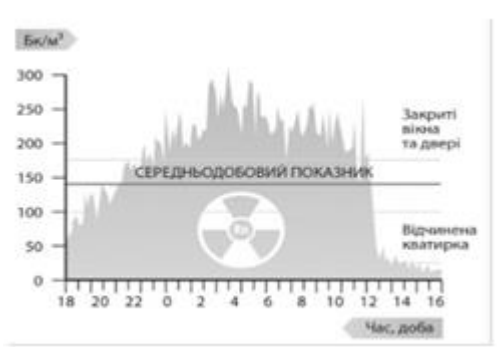


Рис. 1. Коливання активності радону у повітрі приміщення упродовж доби



Рис. 2. Коливання активності радону в повітрі приміщення упродовж місяця

Для вимірювання рівнів радону було використано радіометр Radon AlphaE (Radon Monitor), принцип роботи якого базується на прямому альфа-спектрометричному вимірюванні активності радону в повітрі з використанням напівпровідникового детектора.

Дослідження матеріалів (пісок, цемент, щебінь), які використовуються для виробництва плит, бруківки та бордюрного каменю, продемонстрували, що найбільший внесок у концентрацію радону в приміщеннях вносять дрібнодисперсні пористі фракції та мінерали з підвищеним вмістом урану і торію [2]. Це підтверджує необхідність проводити скринінг матеріалів ще на етапі вибору сировини, обираючи варіанти з нижчою природною радіоактивністю.

Експериментальні дослідження показали, що фізична обробка сировини, як-от просіювання, миття та ущільнення, дозволяє зменшити екзальтацію радону на 20–40 %. Додавання сорбентів і мінеральних добавок може знизити цей показник ще на 15–25 %. Поєднання цих методів дає змогу отримати матеріали з мінімальною газовою проникністю.

Результати показують, що застосування систем вентиляції, герметичних фундаментів і спеціальних бар'єрних плівок здатне зменшити рівень радону у внутрішньому повітрі на 50–70 %, навіть за умов використання матеріалів із природним рівнем радіонуклідів. Відтак, отримані результати свідчать, що контроль радону можливий на всіх стадіях, починаючи від вибору сировини і до закінчення будівельного процесу. Ефективність технологій залежить від поєднання фізичних, хімічних і конструктивних заходів. Це дозволяє не лише знизити ризики для здоров'я людей, але й забезпечити екологічну безпеку житлових і громадських будівель.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати свідчать про те, що використання технологій стримування радону й оптимізації вентиляції дозволяє досягнути концен-

трацій газу, які відповідають встановленим державою нормам. Впровадження системного підходу, що охоплює вибір матеріалів і розробку архітектурних рішень, залишається ключовим для забезпечення радіологічної безпеки.

Висновки. Дослідження продемонструвало, що питання контролю радону у будівельних матеріалах має першорядне значення як з екологічної точки зору, так і для забезпечення санітарно-гігієнічних вимог. Радон є природним радіоактивним газом, який може накопичуватися у приміщеннях, створюючи загрозу для здоров'я, особливо якщо використовуються матеріали з високим вмістом радоновмісної сировини або виникають проблеми з вентиляцією. Результати дослідження підтверджують, що концентрація радону визначається не лише хімічним складом сировини, а й технологічними аспектами виробництва, фізичною структурою матеріалів, умовами експлуатації та архітектурними особливостями будівель. Найдієвішими методами мінімізації виділення радону є ретельний підбір сировини з низьким вмістом природних радіонуклідів, попереднє очищення матеріалів, ущільнення їхньої структури та впровадження спеціальних домішок, які знижують пористість. Поряд із цим, правильне планування конструкцій відіграє ключову роль – ефективна вентиляція, герметизація фундаментів і застосування радонозахисних бар'єрів допомагають запобігти накопиченню газу у приміщеннях. Такі підходи гарантують безпечне середовище для проживання. Отже, комплексний підхід до контролю радону – від етапу вибору сировини до стадії архітектурного проектування є важливим елементом створення екологічно безпечних архітектурних рішень та здорового життєвого простору. Отримані висновки можуть бути основою для вдосконалення будівельних стандартів, екологічного моніторингу та державного регулювання у сфері радіаційної безпеки.

Література

1. Друкований М. Ф., Очеретний В. П., Ковальський В. П., Чепуренко В. П. В'яжуче з відходів для дорожнього будівництва. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. Т. 1. С. 50-54.
2. Зубик С. В. Техноекологія. Джерела забруднення і захист навколишнього середовища: Навч. посібник. Львів: Оріяна-Нова, 2007. 17 с.
3. Ковальський В. П., Друкований М. Ф., Олійник Ю. Г. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: Науково-технічний журнал*. 2023. № 1 (34). 190 с.
4. Очеретний В. П., Друкований О. М. Шляхи зниження радіактивності будівельних матеріалів та виробів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2011. № 1. С. 41-45.
5. Цигичко С. П. Оцінка критеріїв еколого-естетичної комфортності архітектурного середовища сучасних міст. *Науково-технічний збірник*. 2009. № 86. С. 421-429.
6. Kendall G. M., Smith T. J. Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection*, 2002. № 22. pp. 389-406
7. Etiope, G., & Martinelli, G. (2002). Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129(3-4), 185-204.
8. Kendall, G. M., & Smith, T. J. (2002). Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection*, 22, 389-406.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025