

- забезпечення безпечних умов праці та збереження здоров'я працівників підприємств забрудненої зони;
- розробка наукових основ реабілітації забруднених лісів і сільськогосподарських земель, вилучених з господарського обігу;
- повторне радіаційне обстеження та вивчення санітарного стану і продуктивності лісів в зоні безумовного відселення і розробка заходів щодо їх стабілізації;
- розробка довготривалої концепції і нової редакції рекомендацій з ведення лісового господарства в умовах радіоактивного забруднення;
- забезпечення дозиметричного контролю продукції та запобігання розповсюдження за межі забруднених територій продукції з наднормативним вмістом радіонуклідів;
- забезпечення наукових досліджень з вивчення міграції радіонуклідів Чорнобильського походження в лісових екосистемах і накопичення їх у продукції лісового господарства.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Калетник Н.Н., Краснов В.П., Ландин В.П. и др. « Рекомендации по ведению лесного хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения » Киев. –Аграрна наука, 1995.–64с.
2. Державний гігієнічний норматив. «Гігієнічний норматив питомої активності радіонуклідів цезію -137 та стронцію - 90 у деревині та продукції з деревини» Київ.- Офіційний вісник України.- 2005.- №46.– С. 164-166.

УДК 625.7.07:330.15

Ю.І.Орловський, д.т.н., професор (Національна академія природоохоронного та курортного будівництва)
К.В.Орловська, к.т.н. (Ялтинський філіал НДІ "Кримпроект")
Р.В.Пархоменко, к.т.н. (Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)

РАДІАЦІЙНОЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ СІРКОВМІСНИХ БЕТОНІВ

Приведено дані про радіоактивність будівельних матеріалів і питання регламентації змісту природних ізотопів. Розглядаються проблеми радіаційного захисту будівельних матеріалів і конструкцій. На підставі досліджень радіаційно-захисних властивостей сірки і сірковмісного бетону, запропоновані склади сірковмісного бетону поліфункціонального призначення. Розглянуто питання газопроникності сірковмісного бетону при дифузії радіоактивного газу радону-222.

1. Іонізуючі випромінювання і радіоактивність будівельних матеріалів.

Джерелами іонізуючого випромінювання є, поряд із природними космічними променями, що проникають на Землю, радіонукліди, що утримуються в земній корі, повітрі, воді, живих організмах, у тому числі організмі людини. Випромінювання виходить також зі штучних джерел таких як: прискорювачі заряджених часток, медичне устаткування, електричний струм, ядерні реактори, а також виникає при ядерних випробуваннях і аваріях. Більшість країн має у своєму розпорядженні дані про дози різних природних і штучних джерел випромінювань, одержуваних людиною. Варто помітити, що ці дози для різних територій нашої планети різні і багато в чому залежать від радіоактивності порід, що складають дані території і місця проживання людей. Так, наприклад „Радіологічний польський атлас”, опублікований у 1992 році на основі досліджень Центральної лабораторії радіологічного захисту, містить дані про середньорічний розпад радіонуклідів в урано-радієвому ряді (табл. 1) [1].

Середньорічна концентрація радіонуклідів

Джерело і вид випромінювань	Середньорічний ефективний рівень дози	
	мЗв	%
<u>Природні джерела</u>		
Гамма-випромінювання поза будинками	0,04	1,1
Те ж, усередині будинків	0,38	10,6
Радон-222 поза будинками	0,29	8,1
Те ж, у будинках	0,06	1,6
Торій-232	0,17	4,7
Внутрішній розпад	0,39	10,8
Всього	2,76	76,7
<u>Штучні джерела</u>		
Джерела, які використовуються в медицині	0,78	21,6
Радіоактивні опади в результаті ядерних випробувань і аварій	0,03	0,9
Інші, у тому числі предмети домашнього побуту	0,03	0,8
Всього	0,84	23,3
Середньорічні дози опромінення, отримані кожним жителем Польщі в 1991 році	3,60	100

З таблиці 1 видно, що природні джерела випромінювань становлять понад 75% середньорічної дози іонізуючого випромінювання і при середній тривалості життя людини 70 років доза випромінювання від природних джерел складе близько 200 мЗв.

За даними Наукового комітету з атомної радіації ООН середня еквівалентна доза, що одержує людина від земних джерел природної радіації в рік, становить 380 мкЗв, що трохи більше від радіаційного фону [2].

Радіоактивність – мимовільне перетворення нестійких атомних ядер у ядра інших елементів, що супроводжується ядерним випромінюванням. Відомо 4 типи радіоактивності: альфа-розпад, бета-розпад, спонтанне ділення атомних ядер, протонна радіоактивність [4].

Радіоактивність будівельних матеріалів залежить від вмісту нестабільних активних елементів радіонуклідів і продуктів їхнього мимовільного гамма-розпаду. При розпаді радіонуклідів виникають α - і β - іонізуючі випромінювання у виді потоків важких часток, що складаються з нейтронів і протонів. Якщо α -промені не представляють серйозної загрози для людини і живих організмів, оскільки не здатні проникати через шкіру, то β -випромінювання, які мають здатність проникати через тканини організму на глибину до 2 см, що створює серйозні проблеми.

Більшість будівельних матеріалів, не говорячи про техногенні відходи, одержаних в процесі переробки, такі як бокситові шлами, доменні шлаки, відходи переробки фосфорних руд та ін., характеризуються високою радіоактивністю. Вважається, що опромінення людей техногенними джерелами в тисячу разів інтенсивніше за опромінення природними джерелами радіації [2].

Як показують дослідження, найбільшу радіоактивність, за вмістом радію і торію серед будівельних матеріалів, має граніт, при цьому, чим глибше він залягає, тим вища його радіоактивність. Середні питомі радіоактивності будівельних матеріалів, які використовуються різними країнами, за даними [3], приведені в табл. 2. Залежність вмісту калію, урану і торію від виду ґрунтів основ будинків і споруд приведена в табл. 3 [1].

Середня питома радіоактивність будівельних матеріалів [2]

Будівельний матеріал	Вміст радію і торію, Бк/кг	Країна
Дерево	1,1	Фінляндія
Природний гіпс	29	Великобританія
Пісок і гравій	34	Німеччина
Портландцемент	45	Німеччина
Цегла	126	Німеччина
Граніт	170	Великобританія
Зольний пил	341	Німеччина
Глинозем	496	Швеція
Фосфогіпс	1367	Німеччина
Шлаки силікаткальцієві	2140	США
Відходи уранозбагачувальних підприємств	4625	США

Примітка. Радіоактивність радіонуклідів у радіоактивному джерелі характеризується одиницею Сі беккерелем (Бк), що відповідає 1 розпадові в секунду. Для порівняльної оцінки небезпеки іонізуючих випромінювань для живих організмів використовують одиницю Сі зиверт (Зв). 1 зиверт відповідає поглинаючій дозі 1 Дж/кг для рентгенівського, гамма і бета – випромінювань (0,01 Зв = 1 бер).

Таблиця 3

Залежність вмісту калію, урану і торію в залежності від виду ґрунтової основи будинків і споруд [1]

Вид основи	Вміст, Бк/кг		
	Калій-40	Уран-238	Торій-232
Граніт	999	60	80
Базальт	240	10	10
Піщаники	370	19	10
Мулисті сланці	703	40	40
Різні ґрунти	10 - 740	10 - 50	7 - 50

У більшості країн розроблені і діють норми, що регламентують вміст у будівельних матеріалах радіоактивних природних ізотопів. Так, у 2003 р. Рада Міністрів Польщі видала розпорядження, згідно з яким регламентується вміст природних ізотопів у сировині і матеріалах, які застосовуються у будинках, призначених для перебування людей і тварин, а також у промислових відходах, що використовуються у будівництві, і норми контролю цих ізотопів [5]. Згідно з розпорядженням контролю підлягають ізотопи: калій-40, радій -226 і торій - 228.

Вміст природних ізотопів встановлюється за допомогою нормованих коефіцієнтів активності f_1 і f_2 , що визначають вміст ізотопів:

$$f_1 = 0,00027S_K + 0,0027 S_{Ra} + 0,0043S_{Th} \leq 1; \quad (1)$$

$$f_2 = S_{Ra} \leq 185 \text{ Бк/кг}, \quad (2)$$

де S_K , S_{Ra} , S_{Th} - вміст відповідно калію-40, радію Ra-226 і торію Th - 228.

У випадку коли максимальні значення коефіцієнтів f_1 і f_2 сировини, що досліджується, не перевищують 20 % граничних значень f_1 і f_2 , тобто $f_{1\max} \leq 1,0 + 0,2 = 1,2$ і $f_{2\max} \leq 185 + 37 = 222$ Бк/кг, партія сировини може бути допущена до виготовлення будівельних матеріалів і виробів при умові відповідного обмеження маси сировини в складі кінцевого продукту, який повинен задовольняти умову: $f_1 \leq 1$ і $f_2 \leq 185$ Бк/кг [1].

У зв'язку з високою радіоактивністю цілого ряду будівельних матеріалів і виробів, особливо з використанням відходів промислових підприємств при їхньому виготовленні, проблема розробки принципово нових високої радіаційної стійкості матеріалів і захист будівельних конструкцій від іонізуючого випромінювання є особливо актуальною через розвиток атомної енергетики, створення сучасних діагностичних і терапевтичних апаратів і установок, необхідності утилізації радіаційних відходів і т.д.

2. Процеси, що відбуваються при взаємодії гамма-випромінювання з матеріалами.

Проблема радіаційного захисту будівельних конструкцій, будинків і споруд як від природних, так і від штучних іонізуючих випромінювань зводиться до ослаблення і поглинання нейтронів і гамма-випромінювань захисними матеріалами. Вплив іонізуючих випромінювань на властивості і структуру матеріалів залежить від таких факторів [6]:

- хімічного і фазового складу матеріалів, їхньої структури, будови і властивостей;
- радіаційних навантажень – компонентного й енергетичного складу іонізуючих випромінювань, щільності їх потоків, інтенсивностей, значень поглинених доз, їхньої потужності й умов опромінення.

Основні первинні процеси при взаємодії гамма-випромінювання з матеріалами відбуваються з різною імовірністю, що залежить від енергії γ -фотона. При малих енергіях (0,1-0,3 Мэв) основну роль грає фотоэффект (фотоелектричне поглинання), при середніх (0,3-3 Мэв) – комптонівське розсіювання (Комптон-ефект), при великих (більш 3-5 Мэв) – процес утворення пари електрон-позитрон. Взаємодія рентгенівських променів з матеріалами викликає фотоэффект зі зміною їхнього напрямку при некогерентному (ефект Комптона) і когерентному розсіюванні.

Основні процеси взаємодії (первинні) приводять до вторинних, третинних і т.д. явищ. Може відбуватися кілька десятків процесів, перш ніж енергія фотона перейде в енергію молекулярно-теплого руху [7, 8, 9].

Інтенсивність γ -випромінювання після проходження через зразок матеріалу товщиною X підкоряється законові Ламберта - Бугера

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \quad (3)$$

де I_0 – інтенсивність початкового γ -випромінювання, імп/хв;

μ - лінійний коефіцієнт ослаблення, см^{-1} .

Лінійний коефіцієнт ослаблення, який використовується для характеристики ослаблення рентгенівського і γ -випромінювання, показує при якій товщині поглинача інтенсивність падаючого пучка випромінювання I_0 послаблюється в e раз. Робоча формула для визначення μ після логарифмування рівняння (3) має вигляд:

$$\mu = 1/X \ln I_0 / I_x \quad (4)$$

У випадку рентгенівського випромінювання μ можна представити у виді суми трьох доданків, що відповідають когерентному розсіюванню μ_k , некогерентному $\mu_{нк}$ і фотоэффектові μ_{ϕ}

$$\mu = \mu_k + \mu_{нк} + \mu_{\phi}. \quad (5)$$

У випадку γ -випромінювання μ можна представити як суму трьох μ , що враховують основні процеси взаємодії: фотоефект μ_{ϕ} , Комптон-ефект $\mu_{нк}$, і утворення електрон-позитронних пар $\mu_{п}$:

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_{нк} + \mu_{п} \quad (6)$$

Лінійний коефіцієнт ослаблення залежить від густини речовини, порядкового номера елементів, що входять до складу, і їх атомних мас [8]:

$$\mu_{\phi} = 0,0089 \cdot \rho \cdot Z^{4,1} \cdot \lambda^{h/A}, \quad (7)$$

де ρ – щільність матеріалу поглиначя;

Z і A – порядковий номер і атомна маса елементів, що входять до складу поглинаючого матеріалу;

λ – довжина хвилі γ - кванта;

h - емпіричний коефіцієнт.

У випадку ефекту Комптона або утворення електрон-позитронних пар μ - виражається співвідношеннями:

$$\mu_{нк} = \rho \cdot \delta_e \cdot N \cdot Z/A, \quad (8)$$

$$\mu_{п} = k \cdot N \cdot Z^2 \cdot \rho \cdot (E - 1,02)/A, \quad (9)$$

де δ_e – електронний коефіцієнт поглинання, електрон/см²;

N^c – число атомів у 1 см³ речовини;

E – енергія γ – кванта;

k – коефіцієнт пропорційності.

З залежностей (7-9) видно, що чим вища щільність матеріалу - поглиначя і більший порядковий номер елементів, з яких він складається, тим вищими будуть і його захисні властивості. Однак не тільки висока щільність матеріалів може забезпечувати радіаційно-захисні властивості від дії іонізуючого випромінювання, але й особливості структури деяких хімічних елементів, зокрема сірки.

3. Радіаційно-захисні властивості сірки і сірковмісних бетонів.

Відомо, що підвищену радіаційну стійкість мають мінерали із симетричною структурою, координаційної і каркасної будови. Сірка відома в двох кристалічних модифікаціях: ромбічної і моноклінної, але тільки перша стабільна в нормальних умовах. Всі інші алотропи в кінцевому рахунку переходять у неї. З огляду на кристалічну будову сірки можна припускати, що її радіаційна стійкість буде не нижча за стійкість мінералів класу оксидів, що складають основу бетонів і відомих своєю радіаційною стійкістю, а її полімерна модифікація і вода приблизно еквівалентні за ефектом дозового фактора нагромадження часток проникаючих випромінювань. Останнє дає підставу зробити припущення про високу ефективність сірковмісного в'язучого як радіаційно-стійкого матеріалу.

Питання впливу γ – випромінювання на зміну властивостей сірки і її використання в композиційних матеріалах, що піддаються дії іонізуючого випромінювання, висвітлювались в роботах [13-17].

Установлено, що інтегральні коефіцієнти поглинання γ – випромінювання для сірковмісних бетонів і цементних у сухому стані практично однакові. Однак при енергії γ –кванта, рівного 1,332 Мев для сірки, мастики і бетону на її основі, спостерігається збільшення спектрального коефіцієнта поглинання γ -випромінювання, у той час як для цементного бетону коефіцієнт має тенденцію до зниження (рис. 1).

При опроміненні сірки і композицій, що містять сірку, інтегральний і спектральний коефіцієнти поглинання при модифікуванні сірки і підвищенні вмісту модифікатора, зокрема

дициклопентадієна, зростають. На думку авторів це зв'язано з тим, що дициклопентадієн складається з таких легких елементів як вуглець і водень, а відомо, що бетони, що складаються із суміші ядер легких елементів з ядрами елементів з відносно більшою атомною масою, добре поглинають γ – випромінювання і сповільнюють потік нейтронів, тобто сірка відіграє роль своєрідної "енергетичної губки", що здатна поглинати енергію випромінювання і розсіювати її у виді тепла, не зазнаючи при цьому значних змін.

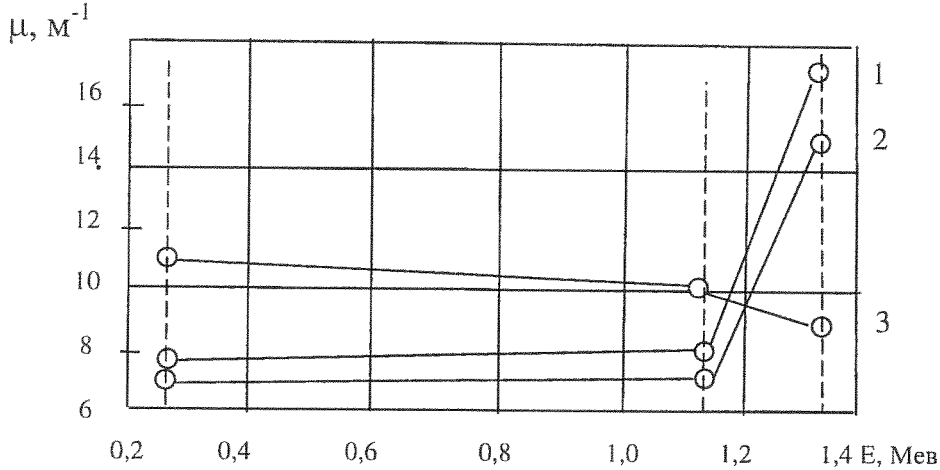


Рис. 1. Залежність спектрального коефіцієнта поглинання γ - випромінювання від енергії опромінення: 1-сірковмісний бетон, сірка модифікована; 2-те ж, сірка немодифікована; 3-важкий цементний бетон.

На підставі проведених досліджень у Національному університеті "Львівська політехніка" під керівництвом Ю.І.Орловського (М.М.Жук[16]) на установках Львівського національного університету ім. І.Франка і Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка при участі В.І. Тарасевича і І.Б. Міхницького, були розроблені радіаційно-захисні склади сірковмісних бетонів. Як джерело γ -випромінювання використовувався ізотоп кобальту Co^{60} , що має дискретний спектр γ -квантів. Розрахунок лінійного коефіцієнта поглинання радіоактивного випромінювання виконувався на основі закону Ламберта - Бугера.

У складах використовувалися чавунний і свинцевий дріб, баритовий щебінь, оксид свинцю, мікрокремнезем (аеросил), цеоліт, перліт, відходи виробництва оптичного скла, скловолокно й ін. Як в'язуче використовувалась технічна сірка, модифікована пластифікуючими, стабілізуючими добавками, антипіренами, біоцидами й ін. Розроблені склади характеризуються високими коефіцієнтами радіаційної стійкості 0,95 - 0,9В, коефіцієнтами лінійного γ -ослаблення 0,32 - 0,51 cm^{-1} і одночасно є складами з підвищеними електроізоляційними й вогнезахисними характеристиками і біоцидними властивостями (патенти України 44603А, 60901А, патент Польщі 354150). Міцність бетонів на стиск становить 52-78 МПа при щільності 3000 - 5700 kg/m^3 залежно від складу.

4. Газова дифузія радіоактивного радону і сірковмісний бетон.

Більше половини серед джерел опромінення складає радон-222 (41,4 % - табл.1), що представляє собою важкий газ, у 7,5 рази важчий за повітря, без кольору і запаху, що накопичується, в основному (39, 8 %) усередині житлових і громадських будинків (особливо непровітрюваних). Радон просочується через ґрунти основ і фундаменти. Середня концентрація радону в повітрі на висоті 1 м від поверхні землі складає 1,2 - 8,6 Bq/m^3 (у середньому 4,4 Bq/m^3), у той час як у будинках коливається від 4 до 600 Bq/m^3 (у середньому близько 40 Bq/m^3). Вміст радону в малоповерхових будинках залежить насамперед від виду ґрунтів основи і якості ізоляції фундаментів і підлоги нижніх поверхів. Близько 75 % радону в повітрі приміщень проникає через основу і тільки 20-25 % - це випромінювання від матеріалів фундаментів, підлоги і ін.

В даний час у різних країнах затверджені норми середньорічного вмісту радону-222 у приміщеннях постійного перебування людей. Так, у США ця норма становить 150, у Німеччині - 250, у Польщі - 200 Бк/м³ [1].

Будівельні матеріали, зокрема цементні бетони, характеризується капілярно-пористою структурою, що утворилася в процесі твердіння цементного каменю і формування структури бетону. Така структура являє собою складну систему хаотично розташованих капілярів розміром від 10⁻² до 10⁻⁷ см і окремих пор діаметром від 10⁻² до 0,5 см. За даними [10, 11] 60-80% сумарної пористості цементного каменю і бетону припадає на капіляри з радіусом 10⁻⁵ см. Крім пор і капілярів цементного каменю, на газопроникність бетону впливає пористість заповнювачів, нещільності зони контакту цементного каменю і заповнювача, технологічні дефекти бетону.

Відомо, що газопроникність бетону залежить від водоцементного відношення. Так, наприклад, збільшення В/Ц від 0,3 до 0,6 приводить до збільшення газопроникності в 25 разів [12, с. 118-121]. Очевидно, що від пористості бетону буде залежати дифузія радіоактивних газів, що проникають через бетонні і залізобетонні конструкції всередину будинків і приміщень. Відомі дослідження параметрів дифузії радону-222 (²²²Rn), що дозволяють оцінити стійкість цементного бетону до дії цього газу [5] з використанням розробленого кінетичного методу. Установлено, що бетон, який є гетерогенним композиційним матеріалом, стосовно радону може вважатися гомогенно дифузійним середовищем. Розроблений метод дозволив порівняно швидко і з достатньою точністю визначити основні параметри дифузійного процесу: дифузійну довжину, пористість матеріалу і коефіцієнт дифузії, що для бетону з об'ємною масою 2,4 і 2,25 г/см³ склали відповідно 12,6 і 16,9, 0,068 і 0,32, 3,34·10⁻⁴ і 6,01⁻⁴ см²/с, що добре співвідносяться з параметрами дифузії, отриманими за допомогою інших методів.

Сірковмісний бетон, на відміну від цементного, характеризується відсутністю капілярно-пористої структури, що дозволяє рекомендувати цей матеріал для газонепроникних конструкцій і захисних покриттів. Дослідження, проведені в інституті сірки у Вашингтоні, показали, що сірковмісний бетон непроникний для багатьох газів, у т.ч. радіоактивного радону. У вітчизняній літературі нам не зустрічалися дані про газопроникність сірковмісного бетону, тому для обґрунтування такого висновку була проведена порівняльна оцінка коефіцієнтів дифузії важкого бетону на кварцовому піску і гранітному щебені об'ємною масою 2300 кг/м³ з водоцементним відношенням В/Ц=0,5 і, на цих же заповнювачах, сірковмісного бетону об'ємної маси 2250 кг/м³.

Прийнята наступна методика визначення коефіцієнта дифузії радону. З циліндричних зразків бетону вирізували диски діаметром 15 і товщиною 3 см. По периметру дисків для герметизації наносилося покриття з епоксидної смоли і вони вставлялися в металевий циліндр такого ж діаметру як диск. З одного кінця циліндра підтримувалася постійна концентрація радону-222, з іншого - по інший бік бетонного диска, через кожні 30 хв. протягом 4 год, визначали концентрацію газу після проходження через диск. Частину зразків випробували в повітряно-сухому стані, частину - при рівноважній вологості. Рівноважна вологість визначалася за різницею між масою зразка висушеного до постійної маси при температурі 90±3°C, і масою зразка постійної вологості (температура 20±3°C, відносна вологість 65 %), віднесеної до маси висушеного зразка. Оскільки установка дозволяла регулювати тиск газу, частина зразків була випробувана при тиску 2-12 ат. Для порівняння були використані результати досліджень [5, 12], приведені на рис.2.

Установлено, що усереднений коефіцієнт дифузії радону, визначений з 6 паралельних вимірів, становить для важкого бетону 4,20·10⁻⁴ см²/с, для сірковмісного бетону коефіцієнт дифузії виявився рівним нулеві. Незначна газопроникність сірковмісного бетону (до 5%) відзначена при тиску більше 0,8 МПа, що, по всій імовірності, є результатом недостатньої герметизації між зразком і стінками циліндра установки.

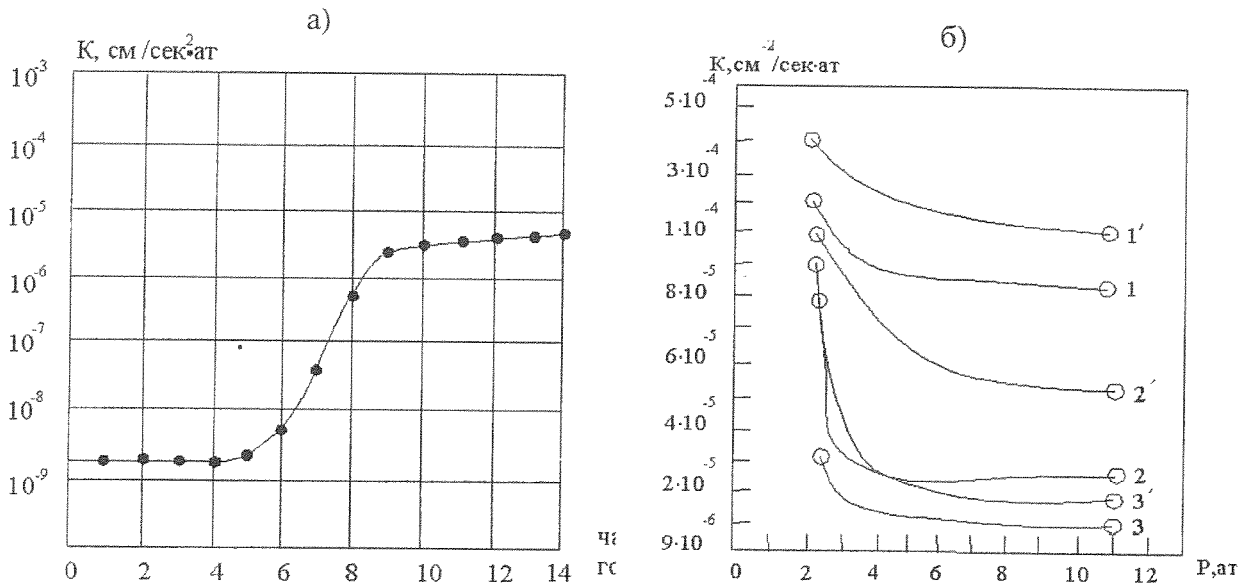


Рис.2. Зміна коефіцієнтів газопроникності: а - насиченого водою бетону в часі при тиску 8 ат; б - зразків бетону різного вологого стану залежно від тиску: 1- бетон класу В2; 2 - те ж, класу В6; 3 - те ж, класу В10 (зразки рівноважної вологості); 1' - 3' - те ж, висушені до постійної маси [12].

5. Висновки і спрямованість подальших досліджень.

Двадцять перше століття є століттям композиційних матеріалів. Велика розмаїтість властивостей компонентів і сучасні технології дозволяють створювати високоефективні композити з поліфункціональним призначенням.

Багато сучасних будівельних матеріалів як штучні, так і природні характеризуються підвищеною радіоактивністю, що вимагає розробки екологічних вимог до матеріалів з погляду їхньої радіаційної і токсичної небезпеки для людей, способів і методів захисту будівельних конструкцій, будинків і споруд як від природних, так і від штучних джерел іонізуючого випромінювання різного ступеня інтенсивності і небезпеки.

Як показують дослідження, перспективними матеріалами для радіаційного захисту від іонізуючих випромінювань є сірковмісні мастики і бетони, що характеризуються не тільки високими фізико-механічними властивостями, але і високим ступенем поглинання γ -випромінювання і газонепроникністю для такого радіоактивного важкого газу як радон-222.

В даний час необхідне проведення комплексних досліджень фізико-механічних властивостей, хімічної і біохімічної стійкості сірковмісного в'язучого на основі полімерної сірки, що є предметом вивчення порівняно нової галузі хімії - хімії неорганічних полімерів. Практично в цьому напрямку проведено обмежене число досліджень, що носять в основному комерційний і рекламний характер. Сірковмісні бетони згодом повинні зайняти своє місце в будівельному матеріалознавстві.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Pienkowski V. *Materialy Budowlane a promieniotworczosc* // *Materialy Budowlane*. - 1997. - №8 (300). - S. 53-54.
2. Платонов А. П. *Строительные материалы и экология* // *Автомобильные дороги*. - 1992. - № 3. - С. 16.
3. *Радиация. Дозы, эффекты, риск. Перевод с англ. Ю.А.Банникова*. - М.: Мир, 1990.

4. Rozporządzenie dotyczące zawartości izotopów promieniotwórczych // *Materialy Budowlane*. – 2003. - №4 (368).
5. Zapalas G. H. A time – dependent method for characterizing the diffusion of ^{222}Rn in concrete // *Health Phys.* – 1983, 45, №2. *Spec. Issue Indoor Radon.* –Pp. 377- 383.
6. Бродер Д. Л., Зайцев Л. Н., Комочков М.М. Бетон в защите ядерных установок.– М.: Атомиздат, 1966. - 240 с.
7. Горшков Г.В. Проникающие излучения радиоактивных источников. - Л.: Наука, 1967.- 395 с.
8. Николаев А. В., Афанасьев Ю.А., Рябинин А. И., Дядин Ю.А., Марчук О.Н. Краткий курс радиохимии. - М. : Высшая школа, 1969. - 335 с.
9. Ремизов. Медицинская и биологическая физика. - М.: Высшая школа, 1987. - 638 с.
10. Ступаченко П. П. Структурная пористость и проницаемость цементного камня в бетоне // *Изв. вузов. Строительство и архитектура.*- 1958.- № 3.
11. Эдельман Л.И., Соминский Д.С., Копчикова Н. В. Исследование распределения пор по размерам в цементном камне // *Коллоидный журнал.* - 1961. - Т. 23. - № 2.
12. Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред. Под ред. В.М.Москвина и Ю.А.Саввиной.- М.: Стройиздат, 1975.- 236 с. (10. Газопроницаемость бетона, с. 118-121).
13. Орловский Ю.И. Бетоны, модифицированные серой: Дис ... д-ра техн. наук 05.23.05. - Харьков, ХИСИ, 1992. - 529 с.
14. Орловский Ю.И., Гордиенко В.П., Жук Н.Н. Радиационно-химическое модифицирование серы и стабилизация ее надмолекулярной структуры // *Вісник Донбаської державної академії будівництва і архітектури.* -Вип.2000-2(22). - Макіївка, ДДАБА, 2000.
15. Королев Е.В., Прошин А. П., Соломатов В.И. Серные композиционные материалы для защиты от радиации. - Пенза:ПГАСА, 2001. - 208 с.
16. Жук Н.Н. Специальные свойства бетонов, модифицированных серой: Дис ... канд. техн. наук:05.23.05. - Одесса, ОГАСиА, 2002. - 246 с.
17. Орловский Ю.И., Жук Н.Н., Королев Е.В., Лецевский Д. Радиационно-защитные свойства полимерсерного бетона // *Материалы III научно-практического семинара: Структура, свойства и состав бетона, вопросы (теории бетоноведения и технологической практики).*– Ровно: Видавництво Рівненського державного центру науково-технічної інформації, 2003. – С. 126-137.