УДК 666.266.6.01

О.В. САВВОВА, М.М. ГОЖА, О.В. БАБІЧ, Д.А. БУЛАВІНА

ОЦІНКА РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ СКЛОРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІММОБІЛІЗАЦІЇ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

У роботі досліджено радіаційно-захисні властивості кальційалюмоборосилікатного скла, модифікованого оксидами важких металів для застосування в системах іммобілізації радіоактивних відходів. Встановлено, що зростання використання іонізуючого випромінювання в медицині, промисловості та ядерній енергетиці зумовлює необхідність створення екологічно безпечних альтернатив Pb-вмісним матеріалам. Метою роботи є оптимізація складу склокристалічного матеріалу для забезпечення ефективного γ-екранування, структурної стабільності та редокс-буферної дії. Теоретичну оцінку параметрів екранування виконано з використанням програмної платформи Phy-X/PSD у діапазоні енергій 0,015–15 МеВ. Обгрунтовано вибір складу кальційалюмоборосилікатного скла з вмістом каталізаторів кристалізації та модифікуючих компонентів. Встановлено, що високий вміст оксидів важких металів (Bi_2O_3, La_2O_3, BaO) підвищує ефективний атомний номер та масовий коефіцієнт ослаблення, тоді як CeO_2 підтримує довготривалу радіаційну стійкість. Показано, що введення 20 мас.% сумарного вмісту Bi_2O_3, La_2O_3, BaO та CeO_2 підвищує ефективний атомний номер і масовий коефіцієнт ослаблення, особливо в області домінування фотоелектричного механізму. У низькоенергетичному діапазоні встановлено мінімальні значення половинного шару ослаблення, що свідчить про високу ефективність матеріалу як γ-екрана. У середньоенергетичній області визначено вплив комптонівського розсіювання, при якому вміст оксидів важких металів забезпечує збереження достатнього рівня лінійного ослаблення. У високоенергетичній області (>5 МеВ) спостерігається стабілізація коефіцієнтів ослаблення, що підтверджує придатність скла для широкого спектра γ-енергій. Теоретична оцінка ефективності радіаційного екранування розробленого скла дозволила встановити критичні параметри у широкому діапазоні енергій γ-випромінювання від 0,015 МеВ до 15 МеВ, що робить матеріал придатним для довготривалого зберігання високорадіоактивних відходів.

Ключові слова: склокристалічні матеріали, кальційалюмоборосилікатне скло, структура, властивості, γ-випромінювання, радіаційна стійкість, радіоактивні відходи.

O.V. SAVVOVA, M.M. GOZHA, O.V. BABICH, D.A. BULAVINA

ASSESSMENT OF RADIATION RESISTANCE OF GLASS CRYSTALLINE MATERIALS FOR RADIOACTIVE WASTE IMMOBILIZATION

The work investigates the radiation-protective properties of calcium aluminoborosilicate glass modified with heavy metal oxides for use in radioactive waste immobilization systems. It is established that the increasing use of ionizing radiation in medicine, industry, and nuclear power engineering necessitates the creation of environmentally safe alternatives to Pb-containing materials. The aim of the work is to optimize the composition of the glass-crystalline material to ensure effective γ-shielding, structural stability, and redox buffering action. The theoretical assessment of the shielding parameters was performed using the Phy-X/PSD software platform in the energy range of 0.015–15 MeV. The choice of the composition of calcium aluminoborosilicate glass containing crystallization catalysts and modifying components is justified. It is established that a high content of heavy metal oxides (Bi_2O_3, La_2O_3, BaO) increases the effective atomic number and mass attenuation coefficient, while CeO_2 maintains long-term radiation stability. It is shown that the introduction of 20 wt.% of the total content of Bi_2O_3, La_2O_3, BaO and CeO_2 increases the effective atomic number and mass attenuation coefficient, especially in the region of dominance of the photoelectric mechanism. In the low-energy range, the minimum values of the half-layer attenuation were established, which indicates the high efficiency of the material as a γ-screen. In the medium-energy range, the influence of Compton scattering was determined, in which the content of heavy metal oxides ensures the preservation of a sufficient level of linear attenuation. In the high-energy range (>5 MeV), stabilization of attenuation coefficients is observed, which confirms the suitability of the glass for a wide range of γ-energy. Theoretical assessment of the radiation shielding efficiency of the developed glass allowed us to establish critical parameters in a wide range of γ-radiation energies from 0.015 MeV to 15 MeV, which makes the material suitable for long-term storage of highly radioactive waste.

Keywords: glass-crystalline materials, calcium aluminoborosilicate glass, structure, properties, γ-radiation, radiation resistance, radioactive waste.

Вступ. Зростання використання іонізуючого випромінювання в медичних, промислових і ядерних технологіях зумовлює підвищений попит на ефективні, міцні та екологічно безпечні матеріали для радіаційного захисту. Традиційні Pb-вмісні матеріали забезпечують високу ефективність екранування, однак їх застосування пов'язане з токсичністю, значною густиною та складністю переробки. Це стимулює пошук альтернативних рішень, які поєднують високу здатність до послаблення γ- та рентгенівського випромінювання з покращеними експлуатаційними характеристиками та екологічністю технології [1].

Радіаційностійкі матеріали використовуються скрізь, де є джерела іонізуючого випромінювання: медицина (діагностична радіологія, променева терапія, радіонуклідні лабораторії, захисне обладнання), промисловість (неруйнуючі методи контролю, ядерні лабораторії і установки, обладнання для стерилізації), ядерна енергетика (атомні електростанції, переробка ядерного палива, виробництво ядерного обладнання: матеріали для реакторів і захисних екранів), космічна промисловість (космічні апарати, супутникові системи, авіаційна техніка) або оборонна сфера (захист військової техніки, захисні споруди та укриття, розробка безпечних детекторів і сенсорів). Попит на такі матеріали зростає особливо для екологічно безпечних і легких альтернатив свинцевим складам, таких як кераміка, склокераміка, стекла та композити на їх основі, які відрізняються високою радіаційною стійкістю (рис.1).

Проблема збільшення радіаційної стійкості матеріалів пов'язана з необхідністю їх довготермінової дії в умовах опромінення, зокрема, для напівпровідникових матеріалів та приладів в

полях ядерного випромінювання дослідницьких реакторів, атомних електростанцій, прискорювачів ядерних частинок та ін. [2]. Підвищення радіаційної стійкості матеріалів для іммобілізації радіоактивних відходів (РАВ) полягає в тому, що надійне утримання радіонуклідів у твердій матриці при довготривалому геологічному зберіганні можливе лише за умов, коли матриця витримує вплив іонізуючого випромінювання без втрати структурної та хімічної цілісності. Це є ключовим завданням для захисту навколишнього середовища та здоров'я людей від небезпечних наслідків радіоактивності [3].

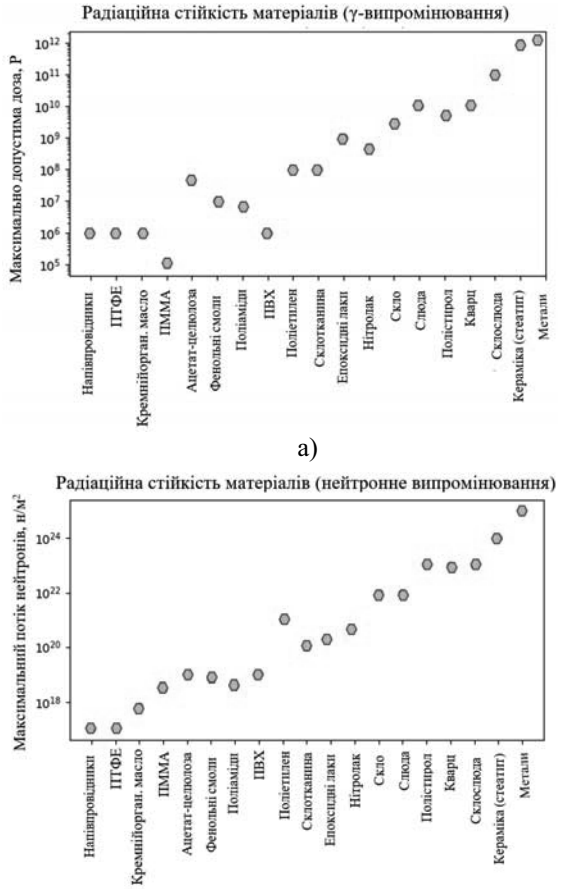

Рисунок 1– Радіаційна стійкість матеріалів:
а – радіаційна стійкість матеріалів (γ-випромінювання);
б – радіаційна стійкість матеріалів (нейтронне опромінювання)

Серед перспективних матеріалів значну увагу приділяють склам, оскільки вони стійкі до корозії та здатні включати значні концентрації оксидів важких металів без втрати однорідності структури. Особливо перпективними є боратні та боротелуритні стекла завдяки низькій температурі плавлення, високій хімічній стабільності та здатності інтегрувати оксиди важких металів у тривимірну скляну сітку без інтенсивної кристалізації. Однак стекла мають низькі механічні властивості, що знижує їх ефективність застосування для іммобілізації РАВ, у випадках коли конструкції можуть зазнавати значних динамічних впливів (стихійні явища, техногенні катастрофи, збройні конфлікти). Тому розробка високоміцних радіаційностійких склокристалічних матеріалів для іммобілізації РАВ є важливою науково-практичною задачею.

Літературний огляд. Pb-вмісні матеріали дуже ефективні в радіаційному захисті завдяки високій густині. Однак вони становлять ризик для здоров'я людини через токсичність свинцю. Як наслідок, дослідження радіаційно-захисних властивостей різних безсвинцевих скляних матеріалів привернуло значну увагу дослідників. Підвищення радіаційної стійкості скла та кераміки досягається введенням оксидів з високим атомним номером (Z), зменшенням пористості та оптимізацією мікроструктури, що збільшує ефективний атомний номер (Z_{eff}), коефіцієнт масового поглинання (МАС) та знижує утворення радіаційних дефектів. Для кераміки додаткову роль відіграє стабільна іонно-ковалентна кристалічна решітка, тоді як у склі важливими є редокс-добавки (наприклад CeO_2) і контроль вмісту лужних компонентів (табл. 1).

Введення до складу стекол оксидів важких металів, зокрема, WO_3, PbO, BaO та Bi_2O_3, CeO_2, La_2O_3 сприяє підвищенню Z_{eff}, МАС і, відповідно, ефективності γ-екранування. Відомо [4], що зростання вмісту Bi_2O_3 у боратних стеклах приводить до підвищення густини, хоча одночасно може знижувати температуру склування та змінювати механічні властивості через зростання кількості немісткових атомів кисню. Таким чином, оптимізація складу потребує узгодження між радіаційними та структурно-механічними характеристиками стекол. Дослідження γ-випромінювання скла системи Bi_2O_3–ZnO–B_2O_3–SiO_2 в діапазоні енергій 0,015–15,000 МеВ за допомогою програмних систем Phy-X/PSD та XCOM дозволило встановити, що зразок скла $45Bi_2O_3$–5ZnO–$20B_2O_3$–$30SiO_2$ має найвищий коефіцієнт лінійного ослаблення (μ), коефіцієнт масового ослаблення (МАС) та ефективний атомний номер (Z_{eff}), а також має найнижчий шар половинного ослаблення (HVL), шар ослаблення в 10 разів (TVL) та довжину вільного пробігу (MFP). Отримані дані показали, що скло $45Bi_2O_3$–5ZnO–$20B_2O_3$–$30SiO_2$ є щонайменше в 2 рази ефективнішим для радіаційного захисту у порівнянні з скломатеріалами на основі Bi_2O_3, які нещодавно були розроблені [5].

Дослідження радіаційно-захисних властивостей боросилікатних стекол загальної формули $16SiO_2$–$14Na_2O$–(70-x)B_2O_3–xBi_2O_3 (x = 0,5, 10 та 15 мол. %) дозволило встановити, що зразок Bi15 демонструє найвище значення μ=0,4196 $см^{-1}$ при енергії 356 кеВ завдяки найвищому вмісту Bi_2O_3 (15 мол. %), тоді як зразок Bi0 демонструє найнижче значення μ. Результати показали, що зразок скла без вмісту Bi_2O_3 має найвищу MFP, яка становить 4,175 $см^{-1}$ при 356 кеВ. Зразок скла Bi15 демонструє найнижчу MFP, що вказує на те, що він є найкращим атенюатором серед дослідних стекол. Шари HVL та TVL були отримані з експериментальних даних μ, і результати показали, що значення HVL менше, ніж TVL, що вказує на те, що зразки повинні бути товщими, щоб працювати як ефективний матеріал для екранування випромінювання [6].

Таблиця 1 – Методи підвищення радіаційної стійкості скла та кераміки

Метод	Механізм впливу	Скло	Кераміка	Результат
Введення оксидів з високим Z (Bi_2O_3, PbO, BaO, CeO_2, La_2O_3)	Підвищення Z_{eff}, MAC, зменшення HVL	+	+	Підвищення γ-захисту
Введення CeO_2 (редокс-пара Ce^{3+}/Ce^{4+})	Пастки електронів, зменшення кольорових центрів	+	+	Зменшення радіаційного потемніння
Зменшення лужних оксидів (Na_2O, K_2O)	Зменшення мобільності іонів	+	частково	Підвищення структурної стабільності
Підвищення густини матеріалу	Зменшення довжини пробігу γ-квантів	+	+	Зменшення проникнення випромінювання
Контроль мікроструктури	Зменшення пористості та дефектів	+	+	Менше центрів радіаційних пошкоджень
Наноструктурування	Рекомбінація дефектів на межах зерен	частково	+	Самовідновлення структури
Іонно-ковалентна кристалічна решітка	Висока енергія зв'язку	аморфна сітка	+	Вища нейтронна стійкість
Термічна обробка	Рекомбінація дефектів	+	+	Відновлення властивостей
Борвмісні добавки (B_2O_3, B_4C)	Поглинання теплових нейтронів	+	+	Підвищення нейтронного захисту
Формування склокераміки	Кристалізація, наноструктурування	+	+	Комбінована стійкість

Авторами [7] було досліджено вплив La_2O_3 на властивості радіаційного екранування скла в системі La_2O_3–CaO–B_2O_3–SiO_2. Енергії були вибрані в діапазоні від 0,284 до 1,275 МеВ, для розрахунків використовувалося програмне забезпечення Phy-X. При всіх енергіях значення ефективного атомного числа (Z_{eff}) відповідають тенденції у ряді BLa10 < BLa15 < BLa20 < BLa25 < BLa30. Коефіцієнт MAC для BLa15 зменшується з 0,150 до 0,054 $см^2/г$ при енергіях 0,284 МеВ та 1,275 МеВ відповідно, тоді як MAC BLa25 зменшується з 0,164 до 0,053 $см^2/г$ для тих самих енергій відповідно. Скло BLa10 має найменший μ при всіх протестованих енергіях, тоді як BLa30 мало найбільший, що вказує на те, що збільшення вмісту La_2O_3 у дослідних стеклах покращує захисні властивості. Результати HVL показали, що BLa30 є найбільш просторово ефективним екраном, а за результатами визначення TVL визначено, що дослідні стекла є більш ефективними атенюаторами при нижчих енергіях аніж при вищих.

Для дослідження структурних та радіаційно-захисних властивостей матриці боратного скла, що містить Na_2O, La_2O_3, CoO та ZnO, автори [8] застосували метод ІЧ-спектроскопії з перетворенням Фур'є в діапазоні 400–1600 $см^{-1}$ та Phy-X в межах енергії фотонів від 0,015 до 15 МеВ. Виміряна густина (ρ) змінювалася від 2,179 до 2,931 з додатковими добавками La_2O_3 у кількості до 8 мол. %. На основі результатів було встановлено, що вміст тетраедричних боратних одиниць (BO_4) збільшується з додатковими добавками La_2O_3. Крім того, дослідження екранування від іонізуючого випромінювання підтвердили, що збільшення кількості La_2O_3 за рахунок B_2O_3 призводить до кращої загальної захисної здатності шляхом збільшення значень MAC. Порівняння HVL досліджуваної скляної матриці та поширених матеріалів для екранування від іонізуючого випромінювання вказує на позитивний вплив La_2O_3 на захисну здатність. Покращені характеристики радіаційного екранування досліджуваної скляної матриці визначають перспективність її застосування для захисту від іонізуючого випромінювання.

Дослідження впливу поступового заміщення Na_2O на La_2O_3 у боросилікатних стеклах загальної формули $60B_2O_3$–20BaO–$10SiO_2$–(10-m)Na_2O–mLa_2O_3 (m = 0; 2,5; 5; 7,5 та 10 мол. %) дозволило встановити взаємозв'язки між структурою та властивостями складу. Термічний аналіз продемонстрував помітне підвищення температури склування (від 538 °C до 630 °C) та стійкості до кристалізації, пов'язане зі збільшенням вмісту La_2O_3. Склад скла з вмістом La_2O_3 5 мол. % продемонстрував найвищу термостабільність (ΔT = 234 °C). Також було відмічене збільшення ρ на 19,4 % (3,09–3,69 $г/см^3$), що покращило ефективність екранування випромінювання. Теоретична оцінка екранування за допомогою платформи PSD/Phy-X показала, що MAC збільшився на 52 % при 0,015 МеВ, тоді як HVL зменшився майже на 30 % при 15 МеВ у повністю заміщеному склі. Ці результати показують, що заміщення La_2O_3 є перспективним підходом до створення боросилікатних стекол для застосувань, що

потребують підвищеної термічної стабільності та ефективного екранування випромінювання [9].

Однак для іммобілізації РАВ критичною є довготривала структурна та хімічна стабільність у полі саморадіації (α-розпад), а не лише екранування γ-випромінювання. Bi_2O_3 і La_2O_3 переважно підвищують густину та γ-екранування, але не забезпечують такого ж редокс-контролю та дефектної стабілізації.

У цьому контексті особливої актуальності набувають склокристалічні матеріали (СКМ), які поєднують переваги аморфної матриці з одночасним вмістом оксидів церію, цинку та кристалічних фаз [10]. Контрольована кристалізація дозволяє формувати у структурі дисперсні кристалічні фази, що містять елементи важких металів, що забезпечує:

– підвищення густини та локального ефективного атомного номера;

– зменшення товщини шару половинного ослаблення;

– покращення механічної міцності та термостійкості;

– стабільність структури під дією радіаційного навантаження.

На відміну від повністю аморфних стекол, склокристалічні матеріали демонструють вищу тріщиностійкість, більшу твердість та кращу стабільність при тривалому опроміненні завдяки наявності кристалічних фаз, які можуть ефективно розсіювати або локалізувати радіаційно індуковані дефекти. Крім того, у склокристалічних системах можливе цілеспрямоване формування фаз із високим вмістом важких елементів, що додатково підвищує γ-екрануючу здатність матеріалу без значного погіршення екологічних характеристик [11].

Тому оцінка радіаційної здатності склокристалічних матеріалів для іммобілізації РАВ є важливою науково-практичною задачею.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження ефективності застосування здатності склокристалічних матеріалів для іммобілізації РАВ.

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання:

– аналіз методів підвищення радіаційної стійкості силікатних матеріалів;

– обґрунтування вибору складів стекол;

– оцінка радіаційної стійкості модельних стекол.

Оцінка радіаційного екранування за допомогою платформи PSD/Phy-X базується на розрахунку фотонно-ядерних параметрів матеріалу за його хімічним складом і густиною. Це спеціалізоване програмне забезпечення було використано для теоретичного розрахунку критичних параметрів у широкому діапазоні енергій γ-випромінювання (від 0,015 МеВ до 15 МеВ), що охоплює енергії, які застосовуються для медичного, промислового та ядерного застосувань.

При нормалізації лінійного коефіцієнту ослаблення (μ) густиною поглинача (ρ), залежність від густини поглинача усувається. Оскільки він не залежить від густини поглинача та фізичного стану, коефіцієнт масового ослаблення МАС, який визначається як μ/ρ, є більш фундаментальним, ніж значення лінійного коефіцієнта [12]. Загальний масовий коефіцієнт ослаблення γ-квантів представлений як сума внесків фотоелектричного поглинання, комптонівського розсіювання та пароутворення, при цьому комптонівське розсіювання відіграє вирішальну роль у середньому енергетичному діапазоні. HVL, TVL та MFP – це інші важливі показники для визначення екрануючих здібностей матеріалу: HVL=0,693μ, TVL=ln10μ, MFP=1μ. Показники HVL та TVL відносяться до товщини матеріалу, яка послаблює половину та десяту частину сили фотона відповідно. MFP – це середня відстань, яку фотон з певною енергією може подолати без будь-якої взаємодії.

Результати експерименту та їх обговорення. Для оцінки радіаційної стійкості було обрано дослідне скло АСР-3МР, яке відрізняється вмістом мас. %: SiO_2 – 45; Σ Al_2O_3, B_2O_3 – 14; Bi_2O_3 – 9; La_2O_3 – 4; Σ CaO, P_2O_5 – 15; TiO_2, ZrO_2 – 3; CeO_2 – 3; Σ ZnO, BaO – 6; MoO_2 – 1. Скло було зварено при температурі 1450 °С у корундовому тиглі в електричній печі.

Довготривала геологічна стабільність при α- та β-опроміненні досягається комплексним введенням оксидів, які впливають на здатність до γ-екранування. Вміст таких оксидів у склі повинен одночасно забезпечувати радіаційну стійкість та не знижувати основні функціональні властивості: механічну, термічну та хімічну стійкість, які визначаються наявністю ситалізованої структури склокристалічного матеріалу.

Найвищою здатністю до γ-екранування характеризується Bi_2O_3, однак вказаний оксид знижує стабільність структури скла у значних кількостях та не має редокс-буферної функції (на відміну від CeO_2), тому не стабілізує валентні стани актиноїдів. CeO_2 має дещо нижчі показники екранування порівняно з оксидом вісмуту, проте забезпечує структурну стабільність завдяки редокс-парі Ce^{3+}/Ce^{4+} та виконує функцію редокс-буфера за схемою (рис. 2). Це критично важливо при впливі на матеріал α-, β- та γ-випромінювання, коли може змінювати валентність актиноїдів.

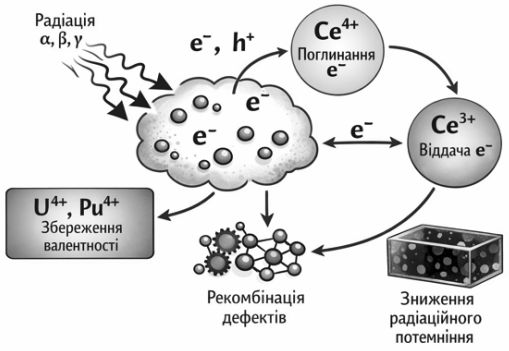

Рисунок 2 – Механізм редокс-буферної функції оксиду церію у складі склокристалічного матеріалу під впливом опромінення

Введення Bi_2O_3 забезпечує підвищення Z_{eff} та зменшення HVL, що покращує γ-екранування СКМ. ZnO сприяє помірному зростанню μ і підвищує хімічну довговічність матеріалу. BaO підвищує густину склокристалічної матриці та ефективність γ-захисту, тоді як Bi_2O_3 забезпечує поглинання теплових нейтронів, що є важливим для комплексного радіаційного захисту.

Теоретична оцінка ефективності радіаційного екранування дозволила встановити критичні параметри у широкому діапазоні енергій γ-випромінювання від 0,015 МеВ до 15 МеВ (рис. 3).

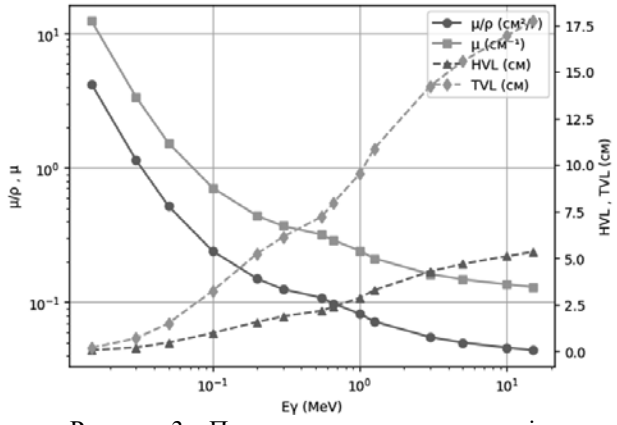

Рисунок 3 – Параметри екранування дослідного скла (0,015 МеВ –15 МеВ)

У низькоенергетичній області (0,015–0,1 MeV) – спостерігається різке зростання μ/ρ та μ, що пояснюється домінуванням фотоелектричного ефекту, який значно залежить від ефективного атомного номера Z_{eff}. У розробленому склі внесок Bi_2O_3 (Z=83) та La_2O_3 (Z=57) забезпечує максимальне поглинання фотонів у цій області, що значно зменшує товщину HVL і TVL.

Для середньоенергетичної зони (0,2–1,5 MeV) характерним є домінування комптонівського розсіювання, що зумовлює зниження μ/ρ до 0,072–0,108 см²/г і відповідне збільшення HVL до 2,0–3,3 см для Cs-137 та Co-60. У цьому енергетичному діапазоні BaO та ZnO надають помірне підвищення ρ та μ, тоді як CeO_2 забезпечує стабільність структури СКМ під впливом випромінювання.

Для високоенергетичної області (>5 MeV) спостерігається стабілізація μ/ρ і μ через збалансоване поєднання розсіювання і пароутворення. Тут ефект оксидів важких металів зменшується, але загальна густина скла (ρ ≈ 2950 кг/см³) забезпечує значний лінійний коефіцієнт ослаблення навіть при високих енергіях.

Для дослідного скла редокс-стабілізація та радіаційна стійкість забезпечується шляхом введення CeO_2, який виконує роль редокс-буфера, запобігаючи формуванню дефектів і забарвлюючих-центрів під впливом γ-випромінювання та β-частинок (рис. 2), що підвищує довговічність матеріалу при іммобілізації високорадіоактивних відходів.

Отже введення до складу скла комбінованого компоненту ΣBi_2O_3, La_2O_3, BaO, CeO_2 = 20 мас. % дозволить забезпечити ефективне поглинання фотонів у всьому діапазоні енергій, зменшуючи HVL до 2–3 см для критичних ізотопів (Sr-90, Cs-137, Co-60), що робить дане скло ефективним матеріалом для іммобілізації високоактивних радіаційних відходів.

Висновки. Оптимізовано склад кальційалюмоборосилікатного скла для одночасного забезпечення максимального γ-екранування, структурної стабільності і редокс-стабілізації**.** Введення 20 мас.% $\Sigma(Bi_2O_3 + La_2O_3 + BaO + CeO_2)$ забезпечує підвищення масового коефіцієнта ослаблення до 4,20 см²/г при 0,015 МеВ та лінійного коефіцієнта до 12,39 $см^{-1}$, що відповідає мінімальному шару половинного ослаблення HVL = 0,056 см. У середньоенергетичній області (0,662–1,25 МеВ) μ/ρ становить 0,072–0,098 см²/г, μ = 0,212–0,289 $см^{-1}$, а HVL зростає до 2,40–3,27 см, що відповідає домінуванню комптонівського розсіювання. У високоенергетичній області (5–15 МеВ) μ/ρ стабілізується на рівні 0,044–0,050 см²/г, μ = 0,130–0,148 $см^{-1}$, при HVL 4,68–5,33 см, що підтверджує ефективність матеріалу в широкому енергетичному діапазоні. Введення CeO_2 (3 мас. %) забезпечує редокс-стабілізацію (Ce^{3+}/Ce^{4+}) та підвищення довготривалої радіаційної стійкості. Отримані показники HVL (2–3 см для 0,662–1,25 МеВ) підтверджують придатність скла для іммобілізації високоактивних РАВ та γ-захисту.

Таким чином досліджуваний склад скла є перспективним для захисту від низько- та середньоенергетичного γ-випромінювання у медичних і ядерних установках, авіаційно-космічних конструкцій у поєднанні з вимогами до міцності та радіаційної стійкості.

Список літератури

1. Onaizi A.M., Amran M., Tang W., Betoush N., Alhassan M., Rashid R.S.M., Fares Yasin M., Bayagoob K.H., Onaizi S.A. Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and the impact of radiation on concrete properties. *Journal of Building Engineering.* 2024. Vol. 97. 110800. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800

2. Kalita P., Parveen R., Ghosh S., Grover V., Kumar Mishra Y., Kumar Avasthi D. Progress in radiation tolerant materials: Current insights from the perspective of grain size and environmental temperature. *Journal of Alloys and Compounds.* 2025. Vol. 1012. 178330. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.178330

3. Savvova O., Teliura N., Hozha M., Babich O., Smyrnova Yu., Lutsiuk I. Measures for immobilization of radioactive waste in the structure of glass and glass-ceramics under martial law. *Ch&ChT*. 2025. Vol. 19 (2). P. 297–306. https://doi.org/10.23939/chcht19.02.297

4. Helmy A. Kh., Salama E., Azooz M. A., Elbatal F. H., Ouis M. A., Elsayed E. Optical, structural, and gamma shielding characteristics of bismuth-doped lithium borosilicate glass composite. *Elshereafy Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. 38106. https://doi.org/10.1038/s41598-025-23089-6

5. Bonginkosi Vincent K. Gamma radiation shielding properties of (x)Bi2O3–(0.5–x)ZnO–0.2B2O3–0.3SiO2 glass system. *Nukleonika*. 2024. Vol. 69 (1). P. 23 – 29. https://doi.org/10.2478/nuka-2024-0003

6. More C.V., Sayyed M.I., Kumar A., P. P. Pawar, Maghrbi Y. Experimental study on borosilicate glasses: influence of Bi2O3 on gamma radiation shielding efficiency. *Radiation Physics and*

Chemistry. 2025. Vol. 237. 112952. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112952

7. Al-Ghamdi H., Dong M., Sayyed M.I., Wang C., Almuqrin A.H., Almasoud F.I. The Vital Role of La2O3 on the La2O3-CaO-B2O3-SiO2 Glass System for Shielding Some Common Gamma Ray Radioactive Sources. *Materials (Basel)*. 2021. Vol. 14(17). 4776. https://doi.org/10.3390/ma14174776

8. Babeer A.M., Amin H.Y., Sayyed M.I., Mahmoud A.E., Sadeq M.S.. Composition influence of La2O3 on the structural and radiation shielding features of CoO–Na2O–ZnO–B2O3 glass matrix. *Optical Materials.* 2024. Vol. 149. 115131. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115131

9. Hordieiev Y., Zaichuk. A. Impact of La2O3 Substitution on the Structural, Thermal, and Radiation Shielding Properties of Sodium–Barium Borosilicate Glasses. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*. 2025. Vol. 7. 70029. https://doi.org/10.1002/ces2.70029

10. Savvova O., Hozha M., Teliura N., Pylypenko O., Zaitseva I. Methodological Principles of Creating Glass Crystal Matrices for Radioactive Waste Immobilization. *Smart Technologies in Urban Engineering.* STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1659. P. 343–354. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_29

11. Savvova O., Hozha M., Zaitseva I., Pylypenko O., Isichenko A. Synthesis and research of glass-crystalline materials for radioactive waste vitrification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2025. Vol. 1499(1). 012065. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012065

12. ALMisned G., Elshami W., Issa S.A.M., Susoy G., Zakaly H.M.H., Algethami M., Rammah Y.S., Ene A., Al-Ghamdi S.A., Ibraheem A.A., Tekin H. O. Enhancement of Gamma-ray Shielding Properties in Cobalt-Doped Heavy Metal Borate Glasses: The Role of Lanthanum Oxide Reinforcement. *Materials.* 2021. Vol. 14 (24). 7703. https://doi.org/10.3390/ma14247703

References (transliterated)

1. Onaizi A.M., Amran M., Tang W., Betoush N., Alhassan M., Rashid R.S.M., Fares Yasin M., Bayagoob K.H., Onaizi S.A. Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and the impact of radiation on concrete properties. *Journal of Building Engineering*. 2024, Vol. 97, 110800. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110800

2. Kalita P., Parveen R., Ghosh S., Grover V., Kumar Mishra Y., Kumar Avasthi D. Progress in radiation tolerant materials: Current insights from the perspective of grain size and environmental temperature. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025, Vol. 1012, 178330. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.178330

3. Savvova O., Teliura N., Hozha M., Babich O., Smyrnova Yu., Lutsiuk I. Measures for immobilization of radioactive waste in the structure of glass and glass-ceramics under martial law. *Ch&ChT*. 2025, Vol. 19 (2), pp. 297–306. https://doi.org/10.23939/chcht19.02.297

4. Helmy A. Kh., Salama E., Azooz M. A., Elbatal F. H., Ouis M. A., Elsayed E. Optical, structural, and gamma shielding characteristics of bismuth-doped lithium borosilicate glass composite. *Elshereafy Scientific Reports*. 2025, Vol. 15, 38106. https://doi.org/10.1038/s41598-025-23089-6

5. Bonginkosi Vincent K. Gamma radiation shielding properties of (x)Bi2O3–(0.5–x)ZnO–0.2B2O3–0.3SiO2 glass system. *Nukleonika.* 2024, Vol. 69 (1), pp. 23 – 29. https://doi.org/10.2478/nuka-2024-0003

6. More C.V., Sayyed M.I., Kumar A., P. P. Pawar, Maghrbi Y. Experimental study on borosilicate glasses: influence of Bi2O3 on gamma radiation shielding efficiency. *Radiation Physics and Chemistry.* 2025, Vol. 237, 112952. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.112952

7. Al-Ghamdi H., Dong M., Sayyed M.I., Wang C., Almuqrin A.H., Almasoud F.I. The Vital Role of La2O3 on the La2O3-CaO-B2O3-SiO2 Glass System for Shielding Some Common Gamma Ray Radioactive Sources. *Materials (Basel)*. 2021, Vol. 14(17), 4776. https://doi.org/10.3390/ma14174776

8. Babeer A.M., Amin H.Y., Sayyed M.I., Mahmoud A.E., Sadeq M.S.. Composition influence of La2O3 on the structural and radiation shielding features of CoO–Na2O–ZnO–B2O3 glass matrix. *Optical Materials*. 2024, Vol. 149, 115131. https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.115131

9. Hordieiev Y., Zaichuk. A. Impact of La2O3 Substitution on the Structural, Thermal, and Radiation Shielding Properties of Sodium–Barium Borosilicate Glasses. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*. 2025, Vol. 7, 70029. https://doi.org/10.1002/ces2.70029

10. Savvova O., Hozha M., Teliura N., Pylypenko O., Zaitseva I. Methodological Principles of Creating Glass Crystal Matrices for Radioactive Waste Immobilization. *Smart Technologies in Urban Engineering. STUE 2024. Lecture Notes in Networks and Systems.* 2024, Vol. 1659, pp. 343–354. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06832-3_29

11. Savvova O., Hozha M., Zaitseva I., Pylypenko O., Isichenko A. Synthesis and research of glass-crystalline materials for radioactive waste vitrification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2025, Vol. 1499(1), 012065. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012065

12. ALMisned G., Elshami W., Issa S.A.M., Susoy G., Zakaly H.M.H., Algethami M., Rammah Y.S., Ene A., Al-Ghamdi S.A., Ibraheem A.A., Tekin H. O. Enhancement of Gamma-ray Shielding Properties in Cobalt-Doped Heavy Metal Borate Glasses: The Role of Lanthanum Oxide Reinforcement. *Materials.* 2021, Vol. 14 (24), 7703. https://doi.org/10.3390/ma14247703

Відомості про авторів / About the Authors

Саввова Оксана Вікторівна (***Savvova Oksana)*** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6664-2274, e-mail: savvova_oksana@ukr.net

Гожа Максим Миколайович (Hozha Maksym) – аспірант кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0009-0004-3751-5902, e-mail: Maksym.Hozha@kname.edu.ua

Бабіч Олена Вікторівна (***Babich Olena)*** – кандидат технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0821-1585, e-mail: lenysjababich@gmail.com

Булавіна Дар'я Андріївна (Bulavina Daria) – магістр кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, м. Харків; Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-2956-2714, e-mail: Darya.Bulavina@kname.edu.ua

Дата надходження статті: 28.02.26 р.
Дата прийняття до друку: 10.04.26 р.