

**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**

**КРИВОБОК РУСЛАН ВІКТОРОВИЧ**



УДК 666.651

**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРАМІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ  
НА ОСНОВІ СИСТЕМИ  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$   
ДЛЯ АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**

Спеціальність 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2024

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Свідерський Валентин Анатолійович,**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», професор кафедри хімічної технології  
композиційних матеріалів

доктор технічних наук, професор  
**Голеус Віктор Іванович,**  
Український державний університет науки і технологій,  
м. Дніпро, професор кафедри хімічних технологій  
кераміки, скла та будівельних матеріалів

доктор технічних наук, професор  
**Луцюк Ірина Володимирівна,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувачка кафедри хімічної технології силікатів

Захист відбудеться «12» грудня 2024 р. о 12<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.03 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (аудиторія 28).

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Людмила ЩУКІНА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Швидке зростання темпів розвитку промисловості вимагає удосконалення виробництва функціональних матеріалів, в тому числі електротехнічної кераміки зі спеціальними властивостями. В 2022 році обсяг світового ринку електротехнічної кераміки оцінювався у 100 мільярдів доларів США, при цьому основна частка її використання припадала на країни з високорозвиненими економіками (Японія, США, країни Європейського Союзу), а за прогнозами світове виробництво електротехнічної кераміки збільшуватиметься зі середньорічним темпом зростання (CAGR) 5,6 % у період з 2024 по 2030 роки.

В даний час до перспективних класів електротехнічної кераміки слід віднести матеріали, а саме радіопрозорі та радіопоглинальні в області надвисокочастотного діапазону. Саме неорганічні радіопрозорі матеріали (РПМ) характеризуються високою однорідністю властивостей, термостійкістю і стабільністю електрофізичних та електродинамічних характеристик в широкому діапазоні радіочастот. В той же час більшість існуючих РПМ за комплексом експлуатаційних властивостей, які мають забезпечити тривалу ефективну експлуатацію виробів, не задовольняють виробників аерокосмічної та військової ракетної техніки.

Тенденції сучасного розвитку функціональних керамічних матеріалів вказують на доцільність використання радіокераміки, яка відповідає вимогам до конструкційних матеріалів для виготовлення елементів конструкцій літальних апаратів. Крім того, вдосконалення авіаційної турбореактивної та ракетної техніки призвело до значного зростання швидкості польоту і маневреності літальних апаратів, внаслідок чого суттєво збільшились аеродинамічні і теплові навантаження на поверхні конструктивних елементів. У зв'язку з цим до такої функціональної кераміки висувається ряд додаткових специфічних вимог, що стосуються стабільності радіофізичних характеристик при експлуатації за умов високих робочих температур, стійкості до теплового удару, ерозійної стійкості до дії пилу і газів при польотах на гіперзвукових швидкостях, низької теплопровідності та теплоємності, високої механічної міцності та відносно низької густини (як фактору зниження маси).

Унікальними в цьому сенсі є керамічні матеріали, отримані шляхом спрямованого синтезу ультрадисперсних кристалічних фаз, оскільки вони поєднують всі необхідні властивості та відрізняються високими робочими температурами (до 2000 °C). Втім, існуючі на сьогодні керамічні функціональні матеріали (кварцові, цирконієві, високоглиноземні, нітрид-силіцієві тощо) мають ряд недоліків, пов'язаних із високою вартістю сировини і багатостадійною високотемпературною технологією їх виготовлення.

Таким чином, науково-практична проблема створення концепції і фізико-хімічних основ, і технології керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки з комплексом покращених і стабільних електрофізичних, електродинамічних та експлуатаційних властивостей на основі алюмосилікатних оксидних систем є актуальною та визначила основні напрямки дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.** Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Здобувач був відповідальним виконавцем держбюджетних тем МОН України: «Розробка теоретичних основ синтезу радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи  $RO-RO_2-Al_2O_3-SiO_2$ » (№ ДР 0116U000856), «Розробка методів синтезу і дослідження радіопрозорих керамічних конструкційних матеріалів на основі алюмосилікатних систем» (№ ДР 0119U002607), «Розроблення складів та технології виготовлення керамічних радіопрозорих носових обтічників для захисних елементів конструкцій літальних апаратів» (№ ДР 0118U002230), «Розробка методів синтезу і дослідження радіопрозорих керамічних конструкційних матеріалів на основі алюмосилікатних систем» (№ ДР 0120U103979), «Підвищення корозійної стійкості та довговічності високотемпературної радіопрозоної кераміки для об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки» (№ ДР 0120U001004), «Розробка теоретичних і технологічних основ виробництва радіопрозоної кераміки на основі системи  $RO-Al_2O_3-SiO_2$  для об'єктів ракетно-космічної техніки» (№ ДР 0122U001314) та держбюджетного замовлення «Розроблення складів та технології виготовлення керамічних радіопрозорих носових обтічників для захисних елементів конструкцій літальних апаратів» (№ ДР 0118U002230), а також виконавцем окремих розділів фундаментальних та прикладних науково-дослідних робіт МОН України: «Розробка методів створення нелінійних керамічних діелектричних середовищ з поліпшеними імпульсними електромагнітними властивостями» (№ ДР 0112U000415), «Розробка наукових основ структурної інженерії функціональних ультрадисперсних неметалевих покриттів» (№ ДР 0113U000455), «Створення малоенергоємних екологічно орієнтованих високоресурсних керамічних матеріалів» (№ ДР 0115U000537), «Розробка фізичних та математичних моделей електрофізичних процесів у термостійких радіопоглинаючих покриттях» (№ ДР 0114U003724).

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є розроблення теоретичних основ і технології радіопрозорих керамічних матеріалів на основі композицій алюмосилікатних систем, за рахунок спрямованого синтезу цільових фаз, здатних забезпечити комплекс необхідних

електрофізичних, електродинамічних і техніко-експлуатаційних характеристик функціональної кераміки.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати вибір цільових кристалічних фаз і базових багатокомпонентних оксидних систем для виготовлення радіопрозорих керамічних матеріалів, які здатні забезпечити задані показники їх електрофізичних, електродинамічних та фізико-механічних властивостей;
- теоретично дослідити субсолідусну будову багатокомпонентних систем  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ,  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  та їх маловивчених раніше підсистем  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  і  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ , визначити їх геометро-топологічні характеристики та області хімічних складів для синтезу цільових фаз – алюмосилікатів стронцію (славсоніт), барію (цельзіан) та силікату цинку (віллеміт), встановити умови їх утворення за знижених температур синтезу, визначити шляхи спрямованого регулювання процесів фазоутворення;
- обґрунтувати вибір оксидних та сировинних композицій на основі алюмосилікатних стронцій-, барій- і цинквмісних систем для синтезу славсоніту, цельзіану та віллеміту як основних фазових складових радіопрозоної кераміки; дослідити механізм фазоутворення при синтезі цільових фаз, їх морфологічні особливості фаз і вплив на фізико-механічні та електрофізичні властивості кераміки;
- дослідити вплив добавок інтенсифікаторів фазоутворення на процеси синтезу славсоніту, цельзіану та віллеміту та визначити можливості формування цільових фаз за умов низькотемпературного синтезу та їх морфологічні особливості;
- вивчити закономірності зміни електрофізичних, фізико-механічних та експлуатаційних властивостей радіопрозорих керамічних матеріалів залежно від їх структури, фазового складу і температурно-часових умов отримання;
- розробити технологію одержання виробів складної конфігурації з використанням отриманих керамічних радіопрозорих матеріалів;
- провести комп'ютерно-імітаційне моделювання поведінки керамічних виробів, отриманих за розробленою технологією, в умовах їх експлуатації з урахуванням наближених до реальних хімічних, газодинамічних та механічних впливів; дослідити експлуатаційні та електродинамічні властивості матеріалів;
- здійснити практичну апробацію запропонованої технології, розробити технічну документацію на виготовлення виробів та впровадити результати роботи у навчальний процес.

*Об'єкт досліджень* – процеси формування фазового складу та структури радіопрозорих керамічних матеріалів для виготовлення захисних конструкцій літальних апаратів.

*Предмет дослідження* – закономірності формування, фазовий склад, структура і властивості радіопрозорих керамічних матеріалів на основі композицій системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> та технологічні параметри виготовлення захисних конструкцій радіотехнічних систем авіаційних об'єктів.

**Методи досліджень.** Теоретичні дослідження проводили із залученням фізико-хімічних розрахунків в системах фазоутворюючих оксидів з урахуванням положень фізичної хімії силікатів, а також з використанням методу хімічної термодинаміки. Експериментальні дослідження фазового складу та мікроструктури матеріалів проведені з використанням комплексу апаратурних методів фізико-хімічного аналізу: рентгенофазового, петрографічного, електронно-мікроскопічного, термічного. Фізико-механічні, електрофізичні, електродинамічні та експлуатаційні властивості розроблених матеріалів визначали згідно з вимогами діючих ДСТУ та міжнародних стандартів ISO. Обробка експериментальних даних та оптимізація складів радіопрозоної кераміки виконані із застосуванням методів математичної статистики із залученням програмних пакетів Microsoft Office Excel і Statistica.

Дослідження проводили з використанням приладів та обладнання кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХП», устаткування Інституту монокристалів НАН України, ПАТ «УкрНДІВ ім. А. С. Бережного», кафедри теоретичної радіофізики Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, кафедри квантової радіофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля», ТОВ «Радіонікс» та Костянтинівського ДНВП «Кварсит».

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

*Вперше:*

- теоретично обґрунтована технологія радіопрозорих керамічних матеріалів на основі композицій, які забезпечують формування алюмосилікатів стронцію, барію і силікату цинку та їхніх комбінацій, що базується на термодинамічно вигідному співіснуванні фаз у субсолідусній області будови багатокомпонентної системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>;
- систематизована і удосконалена база термодинамічних констант сполук, що входять до складу системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>, в частині окремих потрібних алюмосилікатів;
- з урахуванням стабільних фаз в температурному інтервалі 300...1700 К досліджена будова систем SrO – BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrO – ZnO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

$\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ,  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ; надана геометро-топологічна характеристика фаз досліджених систем, на підставі чого виявлені термодинамічно стабільні комбінації фаз:  $\text{BaS}_2 - \text{SrAS}_2 - \text{SrS}$ ,  $\text{SrAS}_2 - \text{Sr}_2\text{AS} - \text{BaS}_2$ ,  $\text{SrAS}_2 - \text{BaS}_2 - \text{A}_3\text{S}_2$ ,  $\text{SrAS}_2 - \text{BaS}_2 - \text{SrA}_2$ ,  $\text{A} - \text{SrAS}_2 - \text{BaS}_2$ ,  $\text{S} - \text{ZA} - \text{Z}_2\text{S} - \text{SrAS}_2$ ,  $\text{S} - \text{Sr}_2\text{ZS}_2 - \text{Z}_2\text{S} - \text{SrAS}_2$ , що забезпечують отримання радіопрозорої кераміки заданого фазового складу;

- встановлені шляхи утворення та температурні області існування цільових фаз: славсоніту, цельзіану стехіометричних складів, твердого розчину «цельзіан-славсоніт» різного ступеню насиченості і комплексу фаз славсоніту та вільеміту. Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що умовою початку формування славсоніту за зниженої температури ( $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ) є утворення  $\text{Sr}_2\text{SiO}_4$  та  $\text{SrSiO}_3$ , починаючи з температури  $400$  та  $500\text{ }^\circ\text{C}$  відповідно. В разі утворення алюмінатів стронцію  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  та  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  (в умовах дефіциту  $\text{SiO}_2$ ) синтез славсоніту йде шляхом утворення та наступного розкладання Sr-геленіту за температури понад  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ . Встановлено, що в порівнянні з ходом синтезу славсоніту фазоутворення протікає активніше, а умовою початку формування цельзіанової фази є силікати барію, що утворюються вже за температури  $270\text{ }^\circ\text{C}$ . Утворення твердого розчину «цельзіан-славсоніт» відбувається через початкове формування насиченої цельзіаном фази  $\text{Ba}_{0,75}\text{Sr}_{0,25}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  з поступовим переходом у  $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  за температури  $1135\text{ }^\circ\text{C}$ . Утворення комплексу фаз славсоніту та вільеміту відбувається поетапно з попереднім твердо-фазовим синтезом вільеміту ( $900\text{ }^\circ\text{C}$ ) і наступним формуванням славсонітової фази за зниженої температури ( $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ) і вищезазначеним механізмом;
- для забезпечення низькотемпературного синтезу цільових кристалічних фаз, досліджений вплив ряду малих добавок, роль яких полягає в утворенні евтектичних розплавів з компонентами шихти. Доведено ефективність дії евтектичної добавки  $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$  у співвідношенні  $60 : 40$  мол. % у кількості  $1$  мас. % понад  $100$  мас. % шихти як інтенсифікатора процесів структуро- та фазоутворення славсонітової та цельзіанової кераміки за температури синтезу  $1250\text{ }^\circ\text{C}$ . Доведено ефективність дії калішпату ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) в кількості  $4$  мас. % понад  $100$  мас. % шихти на інтенсифікацію процесів структуро- та фазоутворення славсоніт-вільемітової кераміки за температури синтезу  $1150\text{ }^\circ\text{C}$ ; експериментально підтверджено можливість використання розроблених керамічних матеріалів на основі системи  $\text{RO} (\text{SrO}, \text{BaO}, \text{ZnO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  із стабільно низькими показниками діелектричних характеристик ( $\epsilon = 4,4 \dots 5,7$ ;  $\text{tg}\delta = 0,005 \dots 0,013$ ) як радіопрозорих матеріалів в діапазоні частот  $26,0 \dots 37,5$  ГГц;

- на основі проведеної прогностичної оцінки хімічної стійкості кераміки цельзіанового, славсонітового та цельзіан-славсонітового складів шляхом термодинамічного аналізу реакцій взаємодії цельзіану та славсоніту з кислотними ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ) та лужними ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) реагентами встановлено, що цільові кристалічні фази виявляють високу хімічну стійкість до дії стандартних лужних розчинів (99,92...99,98 %). По відношенню до стандартних розчинів кислотних розчинів стійкість керамічних проб змінюється в інтервалі 98,24...99,58 %. Зразки складів РПК-Ц, РПК-С, РПК-ЦС продемонстрували високі показники водостійкості (близько 100 %) відносно до морської води;
- за результатами аналізу параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану складнопрофільних виробів з радіопрозорі кераміки визначено, що максимальні переміщення точки конструкції (як параметру, який характеризує жорсткість конструкції) не перевищують 0,3 мм для поверхневого нагріву і 0,4 мм для об'ємного нагріву, що є прийнятним відносно заданих параметрів складнопрофільних радіопрозорих виробів. Максимальні напруження є меншими, ніж значення межі міцності при згині досліджених серій керамічних зразків. Визначено, що мінімальний коефіцієнт запасу міцності є більшим для однофазних керамічних матеріалів, а не багатофазних матеріалів та твердих розчинів, і становить 8,86 та 6,90 для славсоніту та цельзіану відповідно. Це свідчить про те, що складнопрофільні радіопрозорі вироби, виготовлені із зазначеної кераміки, зберігатимуть свою цілісність в жорстких умовах експлуатації;
- запропонована концепція одержання функціональних керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки, яка полягає у контрольованому синтезі цільових кристалічних фаз заданих розмірів кристалів при їх раціональному співвідношенні як у монофазній, так і в гетерофазній кераміці.

*Удосконалена* двостадійна технологія радіопрозорих керамічних матеріалів на основі композицій системи  $\text{RO}$  ( $\text{SrO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ) –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\text{SiO}_2$  в напрямках оптимізації параметрів отримання синтетичного напівфабрикату, низькотемпературного синтезу цільових фаз з використанням інтенсифікаторів фазоутворення, що у сукупності дозволило отримати матеріали із заданими радіофізичними та фізико-механічними властивостями, які у порівнянні з наявними розробками мають підвищену адаптивну здатність зберігати цілісність матеріалу та забезпечувати експлуатаційну надійність радіопрозорих керамічних матеріалів в умовах знакозмінних і високоградієнтних термічних та механічних навантажень.

**Практичне значення отриманих результатів** для авіа- та ракетобудування полягає в тому, що на основі проведених досліджень будови багатокомпонентної системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> та її підсистем визначені області складів, придатних для отримання матеріалів, які задовольняють вимоги до радіопрозорої кераміки та характеризуються наступним рівнем властивостей (в діапазоні частот 26...37,5 ГГц):

- славсонітова кераміка РПК-С: водопоглинання – 0,65 %, уявна густина – 2750 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 1,55 %, межа міцності при згині – 360 МПа, вогнетривкість – 1640 °С, діелектрична проникність – 4,7...4,8, тангенс кута діелектричних втрат – 0,006...0,008, коефіцієнт передачі радіохвиль  $k_{\text{пер}} = 0,4...0,6$  (амплітудний  $k_{\text{пер (a)}} = -4,7...-2,5$  дБ);
- цельзіанова кераміка РПК-Ц: водопоглинання – 1,3 %, уявна густина – 2650 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 2,1 %, межа міцності при згині – 270 МПа, вогнетривкість – 1690 °С, діелектрична проникність – 4,4...4,6, тангенс кута діелектричних втрат – 0,005...0,007,  $k_{\text{пер}} = 0,4...0,5$  (амплітудний  $k_{\text{пер (a)}} = -4,8...-2,9$  дБ);
- цельзіан-славсонітова кераміка РПК-ЦС: водопоглинання – 0,9 %, уявна густина – 3000 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 0,7 %, межа міцності при згині – 175 МПа, вогнетривкість – 1670 °С, діелектрична проникність – 5,6...5,7, тангенс кута діелектричних втрат – 0,010...0,013,  $k_{\text{пер}} = 0,3...0,7$  (амплітудний  $k_{\text{пер (a)}} = -5,6...-1,9$  дБ);
- славсоніт-віллемітова кераміка РПК-СВ: водопоглинання – 0,5 %, уявна густина – 2910 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 1,7 %, межа міцності при згині – 201 МПа, вогнетривкість – 1240 °С, діелектрична проникність – 5,2...5,4, тангенс кута діелектричних втрат – 0,008...0,011,  $k_{\text{пер}} = 0,3...0,6$  (амплітудний  $k_{\text{пер (a)}} = -5,8...-2,3$  дБ).

Розроблена енергозберігаюча технологія отримання РПМ і технічна документація на випуск дослідно-промислових партій. В умовах КДНВП «Кварсит» ДК «Укроборонпром» випущена дослідно-промислова партія трьох видів РПМ із заданими значеннями електродинамічних властивостей і покращеними фізико-механічними характеристиками. Керамічні РПМ, отримані за розробленою технологією, пройшли випробування в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка на кафедрі квантової радіофізики, де визначені їх електродинамічні характеристики. За результатами випробувань розроблені матеріали придатні для використання у розглянутому діапазоні частот 26,0...37,5 ГГц в пристроях захисту радіоелектронної апаратури та відповідають основним вимогам, що висуваються до РПМ.

На базі ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля», ДНВП «Кварсит» та ТОВ «Радіонікс» проведені успішні дослідно-промислові випробування розробленої кераміки в якості радіопрозорих елементів конструкцій.

Новизна розробок захищена 7 патентами України на корисну модель та 1 патентом України на винахід.

Результати досліджень впроваджені в навчальний процес кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХП» та використовуються при підготовці здобувачів I – III кваліфікаційних рівнів освіти за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія».

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати, які викладені в дисертаційній роботі та винесені на захист, отримані особисто здобувачем. Серед них: визначення мети, постановка завдань досліджень, систематизація бази термодинамічних даних сполук, систематизація даних про субсолідусну будову трикомпонентних та чотирикомпонентних систем, проведення термодинамічного аналізу і геометро-топологічної характеристики фаз систем та обґрунтування теоретичної концепції створення радіопрозорих матеріалів, дослідження особливостей механізму фазоутворення при виготовленні кераміки; розробка технології одержання керамічних радіопрозорих матеріалів, спосіб одержання виробів складної конфігурації, узагальнення отриманої інформації, формулювання висновків та впровадження результатів роботи в промисловість і навчальний процес.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на конференціях: The International research and practice conference «Nanotechnology and nanomaterials» (м. Київ, 2014 – 2022); Ukrainian Conference with International participation «Chemistry, Physics and Technology of Surface» (м. Київ, 2017 – 2022); Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ» (м. Львів, 2015); Міжнародній конференції «Космічні технології: теперішнє та майбутнє» (м. Дніпро, 2015, 2017, 2019); Міжнародній науково-практичній конференції MicroCAD «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2014 – 2023); III Всеукраїнській науково-технічній конференції «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів» (м. Львів, 2016); XVIII науковій молодіжній конференції «Проблеми та досягнення сучасної хімії» (м. Одеса, 2016); Міжнародній конференції «The American Ceramic Society Electronic Materials and Applications 2017» (Orlando, Florida, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції «Технологія і застосування вогнетривів і технічної кераміки в промисловості» АТ «УкрНДІ Вогнетривів ім. А. С. Бережного» (м. Харків, 2014 – 2021); Міжнародній науково-практичній конференції магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців» (м. Харків, 2019 – 2022); Міжнародній конференції «IEEE «International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties» (с. Затока Одеської області, 2021, 2022); Міжнародній науковій конференції «Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології» (м. Луцьк, 2021), XXI науково-технічній

конференції «Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах» (м. Чернігів, 2021).

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 56 наукових працях, з них: 23 статті в періодичних виданнях за науковим напрямом, в тому числі – 16 статей у наукових фахових виданнях України (з них 8 статей у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus), 7 статей у наукових періодичних виданнях інших держав (з них 2 статті у журналах Scopus та 5 статей у журналах WoS); 3 статті у наукових виданнях, які додатково відображають результати дисертації; 1 монографія та 4 розділи у колективних монографіях; 7 патентів України на корисну модель та 1 патент України на винахід; 17 наукових праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 408 сторінок, з них: 127 рисунків по тексту, 16 рисунків на 11 окремих сторінках; 83 таблиць по тексту, 5 таблиць на 6 окремих сторінках; список використаних джерел інформації з 241 найменування на 27 сторінках; 4 додатки на 82 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність проблеми і теми роботи, показаний зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовані мета та напрямки її досягнення, наведені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, відзначені особистий внесок здобувача та результати апробації роботи.

**Перший розділ** присвячений аналізу науково-технічної літератури з питань теоретичних основ створення радіопрозорих керамічних матеріалів, а також огляду перспективних складів і технологічних рішень з виготовлення силікатних виробів для авіаційної промисловості. Визначені основні вимоги до радіопрозорих матеріалів, а також окреслені переваги та недоліки існуючих видів РПМ.

Систематизовані дані науковців стосовно досліджень будови алюмосилікатних барій-, стронцій- та цинквмісних систем, технологій отримання радіопрозоної кераміки на їх основі. Аналіз теоретичних даних щодо будови багатокомпонентної системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> та її підсистем показав недостатність вивчення, що в свою чергу обмежує їх використання для створення радіопрозорих матеріалів.

Проаналізовані шляхи вдосконалення технології отримання виробів складної конфігурації з електротехнічної кераміки за рахунок регулювання реологічних властивостей отриманих керамічних суспензій, а також інтенсифікації процесів спікання та фазоутворення кераміки.

Проведений огляд сучасних наукових публікацій за напрямком прогнозування поведінки складнопрофільних виробів з радіопрозорої кераміки з урахуванням умов експлуатації авіакосмічної техніки, який показав, що більшість досліджень зосереджена на оптимізації конструкції таких виробів, тоді як роль матеріалу, з якого вони виготовляються, в переважній більшості робіт залишається поза увагою.

Визначений перспективний напрямок дисертації – розробка фізико-хімічних засад створення радіопрозорих керамік славсонітового, цельзіанового і віллемітового складів на основі композицій системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> та опрацювання технології виготовлення з них елементів захисних конструкцій зовнішнього радіотехнічного обладнання авіаційних об'єктів.

**В другому розділі** наведені відомості щодо сировинних матеріалів, методів виготовлення зразків, а також надана характеристика методик та обладнання для теоретичних та експериментальних досліджень, які реалізовані в дисертаційній роботі.

Теоретичні дослідження проводили з використанням сучасних методів аналізу оксидних систем згідно з положеннями фізичної хімії і термодинаміки силікатів. Визначення параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану елементів конструкцій літальних апаратів проводили за допомогою ліцензійного програмного забезпечення ANSYS (пакети ANSYS CFX та ANSYS Mechanical).

Діелектричні властивості отриманих матеріалів визначали згідно з методиками діючих стандартів з використанням приладів: тераомметра Е6-13А та RLC-вимірювача імпедансу Е7-8. Вимірювання електрофізичних характеристик проводили хвилеводним методом у надвисокочастотному діапазоні (26...37,5 ГГц) на стандартній установці, модернізованій генераторним блоком Р2-65 та індикатором Я2Р-67. Модуль пружності керамічних зразків визначали за допомогою методу інструментального індентування згідно з міжнародним стандартом для механічних випробувань ISO 14577. Визначення вогнетривкості керамічних матеріалів здійснювали стандартним методом за ДСТУ ISO 528:2018. Хімічну стійкість кераміки визначали зерновим методом відносно агресивних реагентів (5 % розчинів HCl та H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 20 % розчинів NaOH та Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Процеси структуро- та фазоутворення радіопрозорої кераміки досліджували із залученням термічного аналізу (термічний синхронний аналізатор STA 409PC), рентгенофазового аналізу (ДРОН-3М, SHIMADZU XRD-6000) та електронної мікроскопії (скануючий електронний мікроскоп PHENOM Pro).

При проведенні досліджень використані методи факторного та симплекс-ґратчастого планування експерименту. Для статистичної обробки експериментальних даних застосовували метод регресійного аналізу,

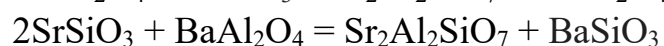
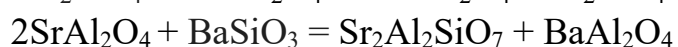
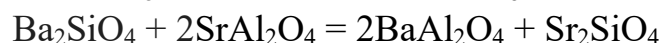
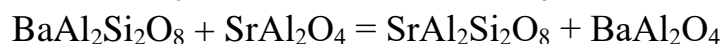
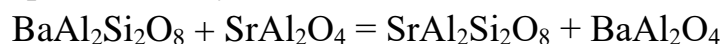
реалізований за допомогою прикладної програми для Excel, а також стандартного пакету “Statistica”.

**В третьому розділі** представлені теоретичні дослідження субсолідусної будови чотирикомпонентних систем  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  та  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  та їх потрійних підсистем для теоретичного обґрунтування можливості та умов синтезу цільових фаз в різних комбінаціях для створення на їх основі радіопрозорих керамічних матеріалів з необхідними значеннями діелектричних характеристик.

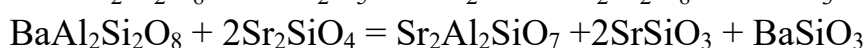
Систематизована і доповнена база термодинамічних констант сполук системи  $\text{RO} (\text{SrO}, \text{BaO}, \text{ZnO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  в частині потрійних алюмосилікатів. Термодинамічні дослідження імовірності утворення славсоніту, цельзіану та вільеміту, в тому числі із застосуванням природної і технічної сировини, надали теоретичний опис процесів, що дозволило визначити вихідну сировину і оптимальні температурно-часові режими їх синтезу. Необхідною умовою енергоощадного синтезу славсоніту є інтенсифікація реакції взаємодії кварцу та карбонату стронцію і метасилікату стронцію з кварцом та глиноземом, а також обмеження утворення алюмінатів стронцію, що можуть утворювати стронцієвий геленіт. Термодинамічними розрахунками встановлено, що утворення цельзіану найбільш вірогідне з використанням природної сировини – каолініту.

Розраховані та проаналізовані геометро-топологічні характеристики фаз трикомпонентних систем  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  та  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ . Система  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  містить фази з високою імовірністю існування, зокрема  $\text{BaO}$  (0,289),  $\text{SrA}_6$  (0,1679),  $\text{SrA}$  (0,2027)  $\text{Sr}_3\text{A}$  (0,1001), що належать до трикутників, сумарна площа існування яких є максимальною. В системі  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  найбільшу площу мають трикутники  $Z - \text{SrA}_6 - \text{SrA}$  та  $Z - \text{SrA} - \text{Sr}_3\text{A}$ : 359,2 та 249 % відповідно. Найбільшу імовірність існування в цій системі мають фази  $Z$  (0,312),  $\text{SrA}_6$  (0,168),  $\text{SrA}$  (0,203), які належать елементарному трикутнику  $Z - \text{SrA}_6 - \text{SrA}$  з найбільшою площею.

В системі  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  встановлена можливість протікання 5-ти реакцій типу  $aA + bB = cC + dD$ :



та 4 супряжених реакцій:





Встановлено, що за температури вище 1200 К існують наступні коноди:  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{SrAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Ba}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Sr}_2\text{SiO}_4 - \text{BaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{BaAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{BaSiO}_3$  та комбінації фаз («заповнений» трикутник) (рис. 1):  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{SrSiO}_3 - \text{BaSiO}_3$ ,  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{SiO}_2 - \text{SrSiO}_3$ ,  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{BaSiO}_3 - \text{SrSiO}_3$ ,  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{BaAl}_2\text{O}_4 - \text{BaSiO}_3$ .

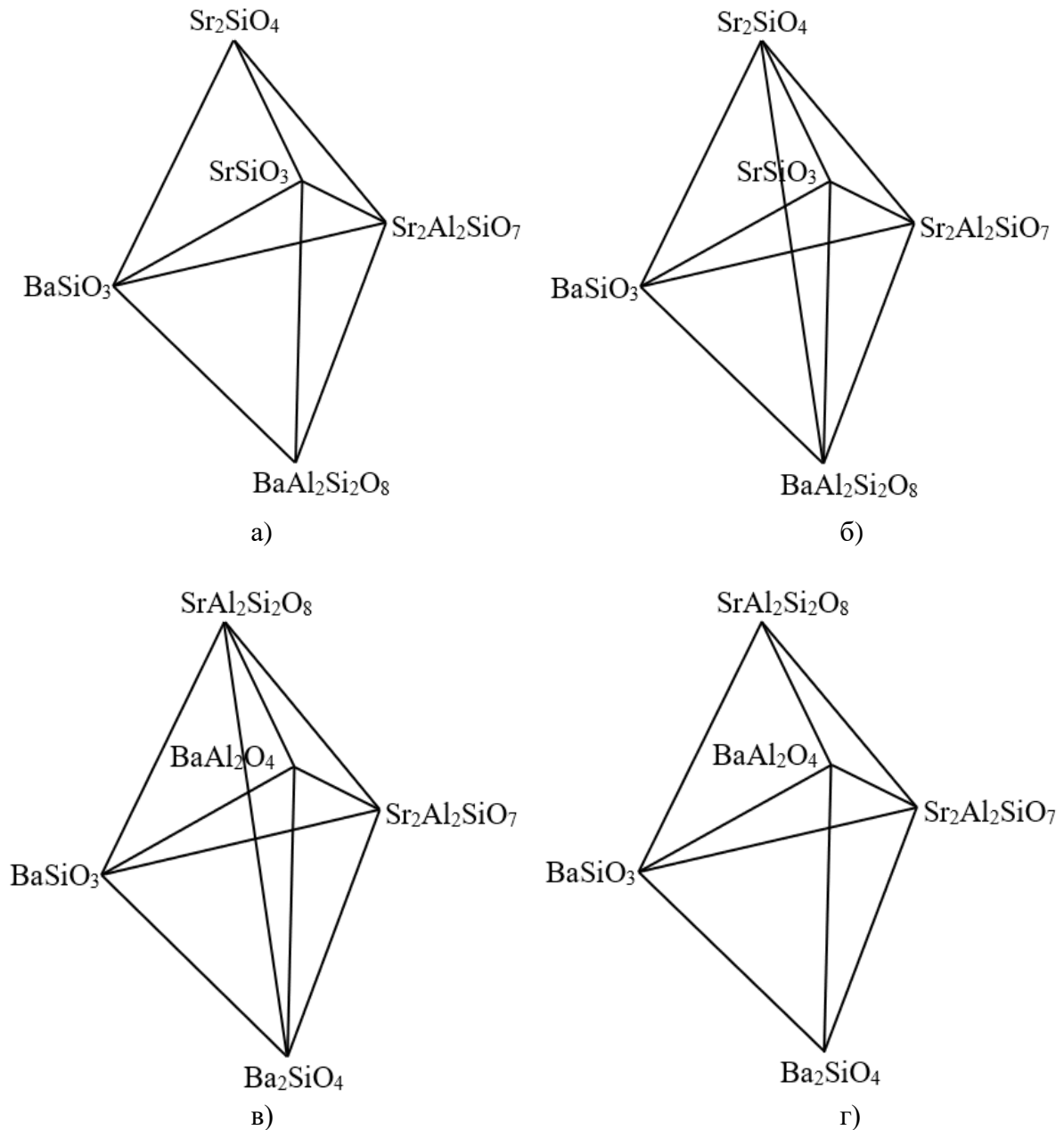


Рисунок 1 – Елементарні тетраедри системи  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  в області  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{Sr}_2\text{SiO}_4 - \text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{SrSiO}_3 - \text{BaSiO}_3$  в інтервалі температур 300...800 К (а) та 800...1700 К (б) та в області  $\text{BaSiO}_3 - \text{BaAl}_2\text{O}_4 - \text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 - \text{Ba}_2\text{SiO}_4 - \text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  в інтервалі температур 300...1190 К (в) та 1190...1700 К (г)

Встановлено, що система  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  (рис. 2) розбивається на 28 елементарних тетраедрів. Визначені перерізи системи,

перспективні для створення радіопрозорі кераміки:  $\text{BaS}_2 - \text{SrAS}_2 - \text{SrS}$ ,  $\text{SrAS}_2 - \text{Sr}_2\text{AS} - \text{BaS}_2$ ,  $\text{SrAS}_2 - \text{BaS}_2 - \text{A}_3\text{S}_2$ ,  $\text{SrAS}_2 - \text{BaS}_2 - \text{SrA}_2$ ,  $\text{A} - \text{SrAS}_2 - \text{BaS}_2$ , які містять як цельзіан, так і славсоніт.

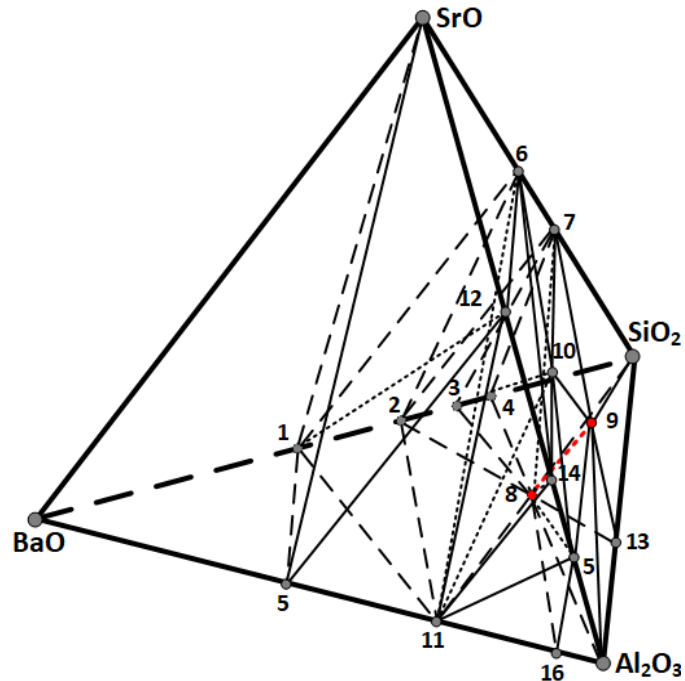


Рисунок 2 – Субсолідусна будова системи  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

В результаті геометро-топологічного аналізу фаз системи  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  (рис. 3) встановлено, що для синтезу радіопрозорих керамічних матеріалів придатними є конода, що містить славсоніт та віллеміт:  $\text{Z}_2\text{S} - \text{SrAS}_2$ . Перспективними для використання в технології радіотехнічної кераміки та для служби за підвищених температур є комбінації фаз в елементарних тетраедрах  $\text{S} - \text{ZA} - \text{Z}_2\text{S} - \text{SrAS}_2$ ,  $\text{S} - \text{Sr}_2\text{ZS}_2 - \text{Z}_2\text{S} - \text{SrAS}_2$ .

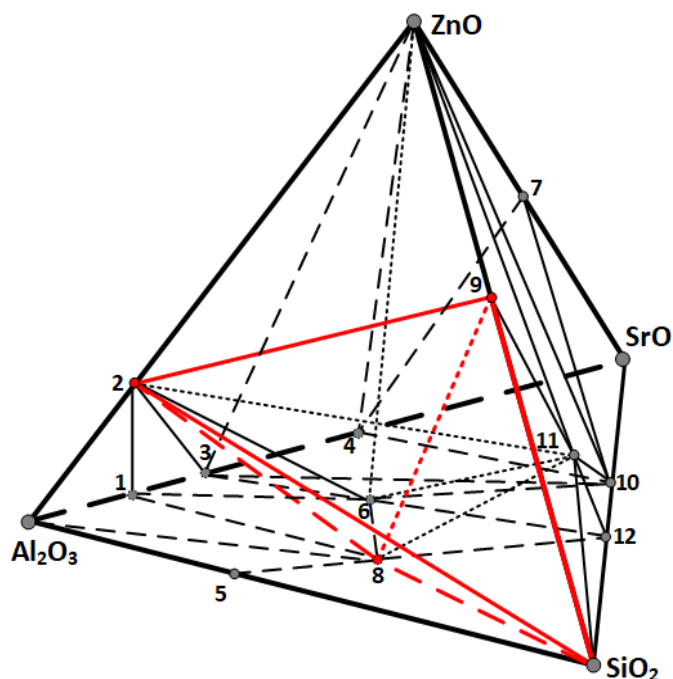


Рисунок 3 – Субсолідусна будова системи  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Проведені теоретичні дослідження склали підґрунтя для наступного етапу роботи з розробки сировинних композицій для синтезу цільових фаз у заданих співвідношеннях у керамічних матеріалах на основі систем  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  і  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ .

**Четвертий розділ** присвячений експериментальним дослідженням, які спрямовані на розробку в дослідних системах вихідних композицій зі зниженою температурою формування цільових фаз у керамічному матеріалі-напівфабрикаті на першому етапі технології, а також встановленню закономірностей зміни властивостей досліджуваних матеріалів залежно від параметрів їх отримання і структурно-фазових особливостей.

Запропоновані області оксидних і сировинних композицій з використанням технічної сировини для одержання матеріалів-напівфабрикатів із заданими електрофізичними та фізико-механічними властивостями і зниженою температурою синтезу цільових фаз та їх комбінацій. Зокрема, розроблені композиції для отримання монофазних матеріалів на основі славсоніту і цельзіану з температурою формування  $1350\text{ }^\circ\text{C}$ , які характеризуються: уявною густиною  $2090$  і  $2330\text{ кг/м}^3$ , діелектричною проникністю  $7,4$  і  $8,9$ , межею міцності при стиску  $99$  і  $85\text{ МПа}$  відповідно.

Встановлені раціональні склади композицій для отримання цельзіан-славсонітової кераміки з температурою формування  $1450\text{ }^\circ\text{C}$  у співвідношенні  $1 : 3$  і такими властивостями: уявна густина –  $1900\text{ кг/м}^3$ , діелектрична проникність –  $9,7$  при частоті  $1\text{ кГц}$ , межа міцності при стиску –  $38\text{ МПа}$ .

В системі  $\text{ZnO} - \text{SrO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  встановлений склад кераміки зі співвідношенням славсоніту та віллеміту  $1 : 1$ , температурою формування  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  і такими властивостями: уявна густина –  $1980\text{ кг/м}^3$ , діелектрична проникність –  $5,98$  при частоті  $1\text{ кГц}$ , межа міцності при стиску –  $22\text{ МПа}$ .

Для регулювання процесів синтезу цільових фаз, виходячи зі встановленого впливу проміжних сполук на фазоутворення, проведені експериментальні дослідження температурних інтервалів існування проміжних сполук при синтезі славсоніту, цельзіану, твердого розчину на їх основі, а також при сумісному синтезі славсоніту та віллеміту. Такі дослідження, проведені на стехіометричних складах цільових фаз та їх окремих комбінацій з використанням термічного (рис. 4) та рентгенофазового аналізів, дозволили уточнити можливі шляхи синтезу цільових фаз із технічної сировини.

Встановлено, що синтез славсоніту за реакцією  $\text{SrO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{SiO}_2 = \text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  відбувається за температури вище  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , утворення славсоніту відбувається за участі силікатів стронцію, синтез яких починається за нижчих температур –  $\text{Sr}_2\text{SiO}_4$  за  $400\text{ }^\circ\text{C}$  та  $\text{SrSiO}_3$  за  $500\text{ }^\circ\text{C}$ .

Також показано, що в умовах дефіциту  $\text{SiO}_2$  можливе утворення алюмінатів стронцію  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  та  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ , що є негативним фактором для низькотемпературного синтезу фаз: в цьому випадку синтез славсоніту відбувається за температури  $\sim 1600^\circ\text{C}$  при розкладанні Sr-геленіту.

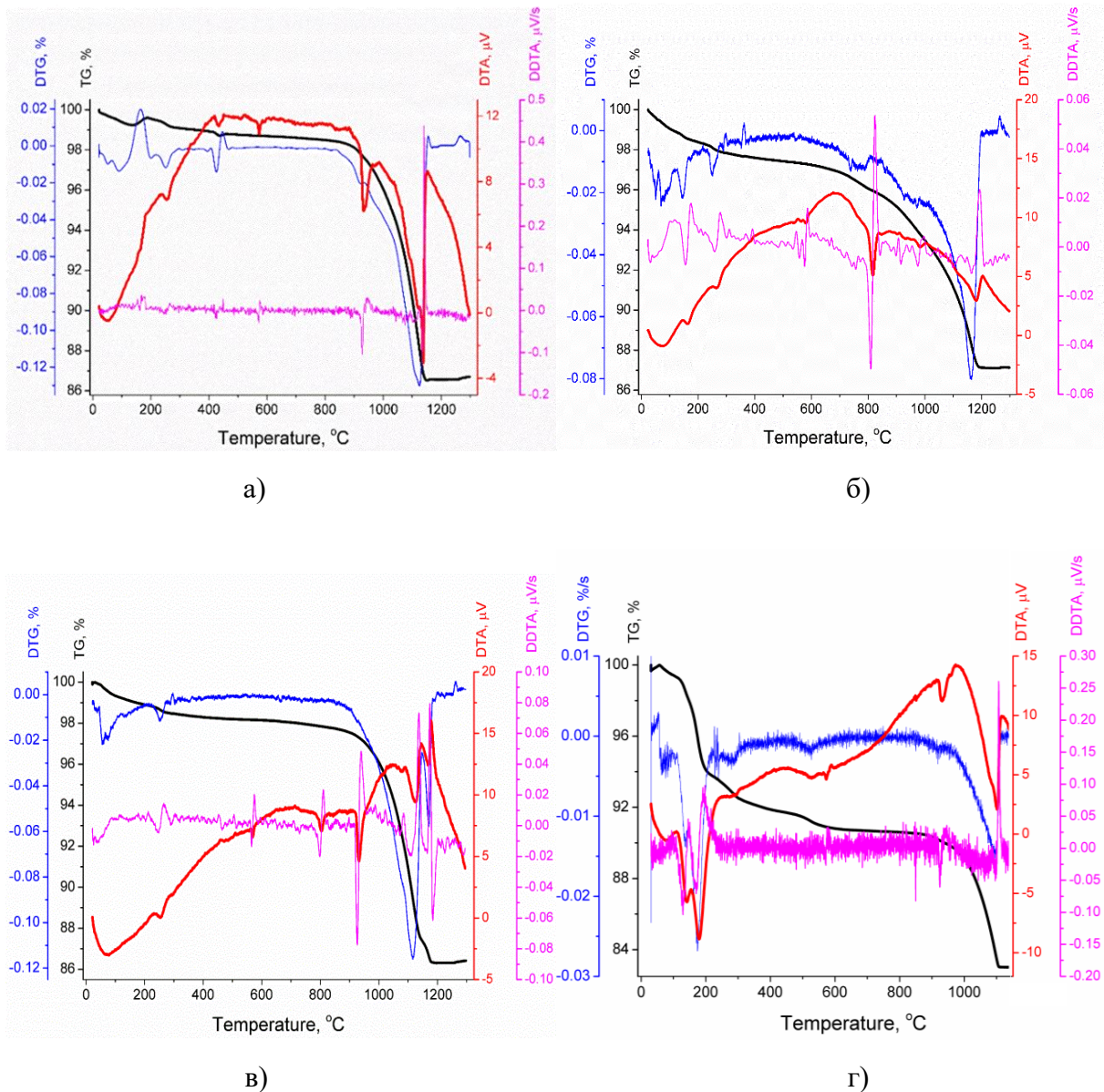


Рисунок 4 – Термограми дослідних шихт:  
 славсонітова РПК-С (а); цельзіанова РПК-Ц (б);  
 цельзіан-славсонітова РПК-ЦС (в); славсоніт-віллемітова РПК-СВ (г)

Визначено, що при синтезі цельзіану першою реакцією є утворення ортосилікату барію, яка розпочинається за температури  $270^\circ\text{C}$  при взаємодії карбонату барію та кварцу. Важливим подальшим проміжним етапом є реакція утворення  $\text{BaSiO}_3$ , цей силікат барію утворюється при взаємодії  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4$  з кварцом та одразу вступає в реакцію утворення цельзіану.

Утворення твердого розчину славсоніту та цельзіану у співвідношенні 3:1 відбувається через формування твердого розчину, насиченого ВаО у зворотній пропорції з поступовим насиченням оксидом стронцію та переходом в  $\text{Ba}_{0,25}\text{Sr}_{0,75}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  за температури 1135 °С. Також встановлено, що 25 % цельзіану достатньо для того, щоб унеможливити утворення високотемпературного Sr-геленіту. Сумісний синтез славсоніту та віллеміту відбувається іншим шляхом та в інших температурних інтервалах у порівнянні з монофазним славсонітом. Не спостерігається утворення силікатів стронцію при взаємодії  $\text{SiO}_2$  із  $\text{SrCO}_3$  аж до температури початку його декарбонізації, що починається близько 900 °С. Це пояснюється тим, що оксид цинку активно взаємодіє з кварцом з утворенням віллеміту і таким чином відіграє роль «інгібітора» низькотемпературного синтезу силікатів стронцію.

Досліджений вплив температурно-часових умов синтезу цільових фаз на процеси фазоутворення та ступінь спікання цельзіанової, славсонітової, цельзіан-славсонітової кераміки. Встановлено, що шестигодинна витримка за температури випалу 1350 і 1450 °С забезпечує повне протікання синтезу заданих фаз. Відповідно для славсоніт-віллемітової кераміки достатньо 4-годинної витримки і температури 1200 °С. Отримані продукти синтезу (матеріали-напівфабрикати) характеризуються низьким рівнем спікання (узагальнено водопоглинання знаходиться в межах 10...31 %) і невисоким рівнем механічної міцності, що є технологічною перевагою, враховуючи необхідність їх помелу.

Проаналізований вплив ряду добавок з функцією інтенсифікаторів фазоутворення і спікання ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ ) на процеси синтезу цільових фаз та експлуатаційні характеристики матеріалів. Визначено, що кращою, з точки зору інтенсифікації спікання та повноти фазоутворення у матеріалах-напівфабрикатах, є евтектична добавка  $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ . При випалі за температури 1250 °С впродовж 2 год ця добавка в кількості 1,5 мас. % забезпечує нульове водопоглинання славсонітової та цельзіанової кераміки, а для цельзіан-славсонітової кераміки водопоглинання становить 2,07 %. За температури випалу 1350 °С нульове водопоглинання цельзіан-славсонітової кераміки досягається при вмісті 1 мас. % евтектичної добавки.

Встановлений позитивний вплив добавки калішпату (4 мас. %) на процеси спікання та фазоутворення керамічних матеріалів славсоніт-віллемітових складів зі співвідношенням цільових фаз 1 : 0,8. Ця добавка забезпечує низьке водопоглинання (0,67 %) та низьку діелектричну проникність – 5,02 для зразків матеріалів, отриманих за температури 1150 °С.

На прикладі цельзіан-славсонітової кераміки проаналізований вплив евтектичних добавок на структуру, фазовий склад і морфологічні особливості синтезованих фаз (рис. 5).

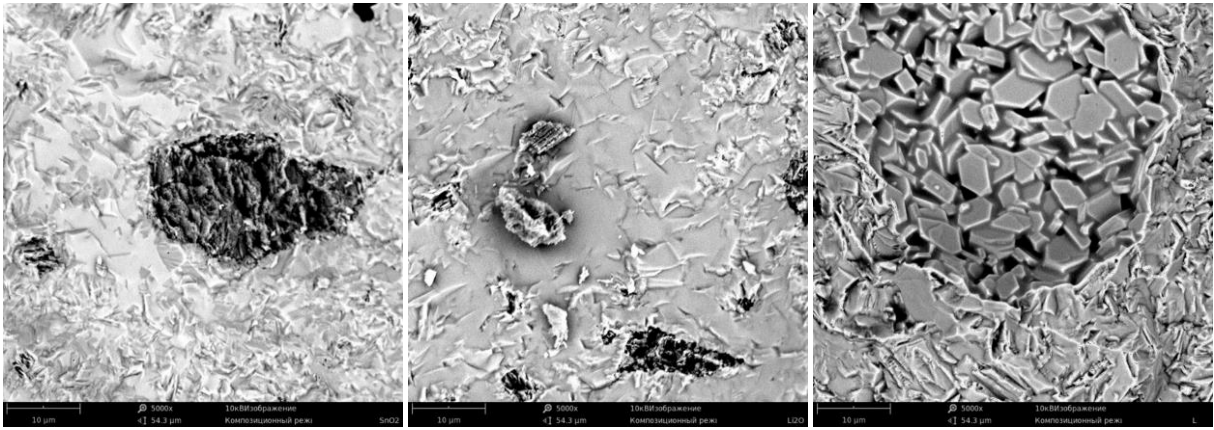
а) з добавкою  $\text{SnO}_2$ б) з добавкою  $\text{Li}_2\text{O}$ в) з добавкою  $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$ 

Рисунок 5 – Мікроструктура цельзіан-славсонітової кераміки з добавками 1,5 мас. % інтенсифікаторів фазоутворення, отриманої за температури випалу  $1250\text{ }^\circ\text{C}$  (збільшення  $\times 5000$ )

Визначено, що добавки  $\text{SnO}_2$  і  $\text{Li}_2\text{O}$  при їх окремому використанні сприяють формуванню небажаної склокристалічної структури матеріалів-напівфабрикатів, яка обмежуватиме робочі температури їх експлуатації. Комплексна добавка  $\text{SnO}_2 : \text{Li}_2\text{O}$  забезпечує формування тонкокристалічної структури керамічних матеріалів із середнім розміром кристалів твердого розчину «цельзіан-славсоніт» 5 мкм. Кристали рівномірно розміщені в матеріалі, що не містить крупних пор. Така максимально «монолітна» кристалічна структура забезпечує: водопоглинання керамічних матеріалів на рівні 2,07 %, відкриту пористість 5,67 %, уявну густину  $2740\text{ кг/м}^3$ . За результатами проведених експериментальних досліджень для виготовлення радіопрозорих керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки за двостадійною технологією на основі обраних і досліджених систем запропоновані чотири склади кераміки, які наведені у табл. 1 і використовувалися як модельні для подальшого опрацювання технологічних параметрів виготовлення керамічних виробів.

**В п'ятому розділі** досліджені основні стадії технологічного процесу виготовлення радіопрозорої кераміки для визначення факторів впливу на властивості технологічних сумішей, напівфабрикатів і готових матеріалів, а також їх структуру з метою опрацювання параметрів двостадійної технології виробів складної конфігурації. Опрацьовані такі стадії другого етапу технології з вивченням наступних факторів впливу: подрібнення матеріалів-напівфабрикатів (тривалість помелу), приготування керамічних суспензій (вологість, текучість, коефіцієнт загусності та в'язкість суспензій, вид і кількість розріджуючої добавки), формування виробів методом шлікерного лиття в гіпсові форми (швидкість набору маси), сушка відливок та їх випал (температура і тривалість).

Таблиця 1 – Шихтовий склад модельних композицій

Сировинні матеріали	Назва (шифр) кераміки			
	цельзіанова (РПК-Ц)	славсонітова (РПК-С)	цельзіан-славсонітова (РПК-ЦС)	славсоніт-віллемітова (РПК-СВ)
Кварцовий пісок ДСТУ Б В.2.7-131: 2007	28,7	32,4	31,5	29,5
Глинозем технічний Г-00 ТУ У 07.2-33133003-012:2019	24,5	27,7	26,8	15,8
Карбонат стронцію (марка ХЧ) ТУ 6-09-1609-77	–	39,9	30,1	24,9
Карбонат барію (марка ХЧ) ДСТУ ISO 14254:2005	46,8	–	11,6	–
Оксид цинку (марка ХЧ), ТУ 301-10-013-89	–	–	–	29,8
Складові добавки інтенсифікатора фазоутворення і спікання*				
Карбонат літію (ч) ТУ 6-09-4757-84	0,33	0,33	0,33	–
Оксид стануму (чда) ДСТУ EN 610:2004	0,67	0,67	0,67	–
Калішпат (концентрат) ТУ У 08.1-42363718-001:2021	–	–	–	4,0
*Дозування з розрахунку понад 100 % на суху речовину				

В результаті проведених на даному етапі досліджень визначений оптимальний режим помелу продуктів синтезу (400 об./хв з тривалістю 30 хв); встановлено, що вологість суспензії 30 % та використання розріджувача (0,3 мас. % Dolapix PC 67 або 0,3 мас. % Dolapix PC 67 разом з 0,2 % полівінілацетату) забезпечують оптимальні реологічні властивості шлікера (текучість – 13...15 с, коефіцієнт загусності – 1,85...1,95, в'язкість суспензій – до 11 Па·с, швидкість набору маси відливки на рівні 5,5 г/хв); визначені оптимальні температурно-часові параметри випалу відливок залежно від складу кераміки. Технологічні параметри виготовлення складнопрофільних виробів методом шлікерного лиття з використанням розробленої лінійки моно- і гетерофазних керамік узагальнені в табл. 2.

Методами РФА та SEM досліджені структурно-фазові особливості розроблених видів кераміки. Результати РФА показали, що за температур випалу понад 1250 °С всі зразки складів РПК-С, РПК-Ц та РПК-ЦС є монофазними, що свідчить про повноту протікання реакцій утворення цільових фаз. Отримані дані щодо мікроморфології означених видів монофазної кераміки і гетерофазної кераміки складу РПК-СВ, виготовлених за оптимальних технологічних параметрів, свідчать про реалізацію спрямованого твердофазного синтезу цільових сполук (цельзіану, славсоніту, віллеміту та їх комбінацій) за умови збереження їх стехіометричного складу. Виключення становить монофазна кераміка серії РПК-ЦС, фазовий склад якої представлений твердим розчином цельзіану і славсоніту.

Таблиця 2 – Технологічні параметри виготовлення складнопрофільних виробів

Технологічні параметри	Значення параметрів для одержання виробів з використанням кераміки складу			
	РПК-Ц (цельзіанова)	РПК-С (славсонітова)	РПК-ЦС (цельзіан-славсонітова)	РПК-СВ (славсоніт-віллемітова)
Тонкість помелу сировинних матеріалів	Залишок на ситі № 0063 не більше 1 %			
Вологість брикетів, %	7...8			
Температура випалу брикетів (синтез цільових фаз)	1250			1150
Тонкість подрібнення брикетів, мм	2...3			
Вологість шлікера, %	25...30			
Текучість шлікера, с	13...15			
Коефіцієнт загусності шлікера	1,85...1,95			
Швидкість набору маси, г/хв	5,3...5,5			
Відносна вологість відливки при видаленні з гіпсових форм, %	5...6			
Температура сушки напівфабрикату, °С	80			
Залишкова вологість після сушки, %	0,5...1,0			
Температура випалу виробів, °С	1350	1350	1350	1200
Тривалість витримки за температури випалу, год	4	4	4	2
Режим охолодження	разом із піччю			

Технологічна схема отримання виробів складної конфігурації з розроблених радіопрозорих керамічних матеріалів в узагальненому вигляді наведена на рис. 6. Схема включає два етапи технології, оптимальні параметри стадій першого етапу наведені вище (Розділ 4).

Технологія виготовлення виробів із славсоніт-віллемітової кераміки на основі системи  $\text{SrO} - \text{ZnO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  загалом схожа з наведеною на рис. 6, але відрізняється від неї в частині вихідної сировини, використаного інтенсифікатору фазоутворення (калішпат), умов синтезу цільових фаз (температура 1150 °С, тривалість 2 год), використання комплексної добавки для надання шлікера необхідних властивостей, а також температури та тривалості випалу виробів (1200 °С, тривалість 2 год).

Характеристика властивостей розроблених керамічних матеріалів, отриманих за рекомендованими технологічними параметрами виробництва на основі розроблених складів, наведена в табл. 3.

### I етап технології



### II етап технології

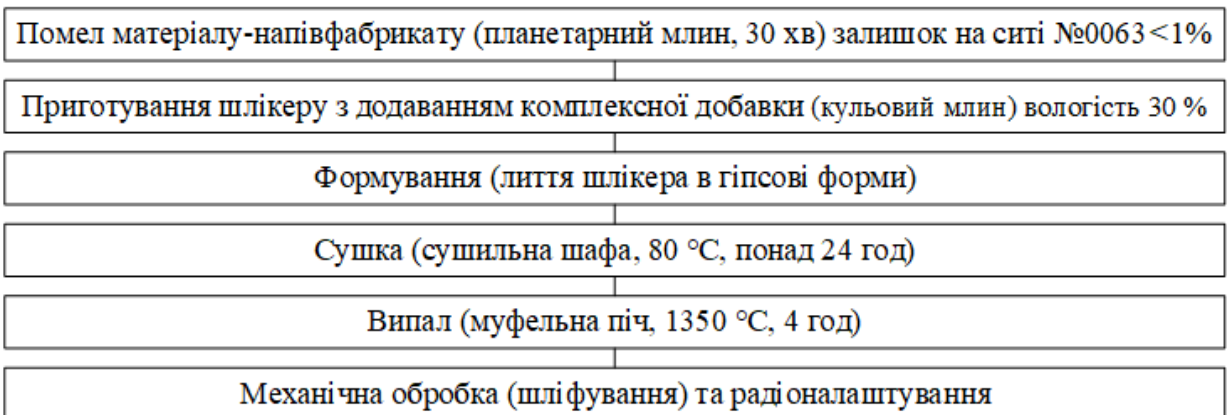


Рисунок 6 – Технологічна схема отримання керамічних виробів складної конфігурації на основі складів РПК-С, РПК-Ц, РПК-ЦС

Таблиця 3 – Властивості розроблених керамічних матеріалів, отриманих за двостадійною технологією

Найменування властивостей	Показники властивостей для різних керамік			
	РПК-С	РПК-Ц	РПК-ЦС	РПК-СВ
Водопоглинання, %	0,7	1,3	0,1	0,6
Уявна густина, кг/м <sup>3</sup>	2800	2700	3060	2980
Відкрита пористість, %	1,6	2,2	0,8	1,8
Межа міцності при стиску, МПа	730	560	364	452
Межа міцності при згині, МПа	368	276	172	202
Діелектрична проникність при частоті 1 кГц	6,42	6,80	5,20	4,56

Встановлено, що за значеннями наведених в табл. 3 характеристик матеріали відносяться до радіопрозорої кераміки та можуть використовуватись в авіакосмічній промисловості для виготовлення захисних конструктивних деталей літальних апаратів. Слід зазначити, що температура служби виробів, виготовлених на основі славсоніт-віллемітової кераміки, обмежується 1100 °С, втім їх застосування в певних областях авіа- та ракетобудування є дуже перспективним, враховуючи комплекс технічних характеристик та міркування економічної доцільності.

**В шостому розділі** представлені результати вивчення поведінки при експлуатації виробу заданої геометрії (складнопрофільна конструкція), отриманого на основі розроблених складів радіопрозорої кераміки, на основі розрахунків параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану, а також досліджень хімічної стійкості матеріалів.

Розрахунки показали, що складнопрофільні вироби з радіопрозорих матеріалів демонструють майже однакову швидкість нагріву поверхні, однак матеріали складів РПК-Ц та РПК-СВ мають порівняно меншу швидкість нагріву об'єкту, що створює більш сприятливі умови для забезпечення цілісності об'єкта та надійності роботи встановленої в середині електроніки в екстремальних умовах служби.

За результатами моделювання також отримані коефіцієнти запасу міцності для розглянутих складнопрофільних радіопрозорих виробів при об'ємному та поверхневому нагріві. Зведені результати моделювання поверхневого та об'ємного нагріву об'єктів з розроблених видів радіопрозорої кераміки представлені в табл. 4 та табл. 5 відповідно.

Таблиця 4 – Результати моделювання: поверхневий нагрів

Параметри/склади		Час	РПК-С	РПК-Ц	РПК-ЦС	РПК-СВ
Переміщення точки конструкції (мкм)		7с	58,95	61,08	130,08	108,96
		макс	133,50	138,57	295,14	251,11
Напруження за Мізесом (МПа)		7с	38,37	40,14	87,16	81,69
		макс	39,00	40,98	88,57	83,30
Головні напруження (МПа)	$\sigma_1$	7с	36,21	35,70	80,78	73,84
		макс	39,00	40,98	88,57	83,30
		мін	–	–	–	–
	$\sigma_3$	7с	–38,69	–40,45	–88,01	–2,68
		макс	–	–	–	–
		мін	–39,31	–41,30	–89,41	–2,68
	$Z_{суб}$	7с	19,71	20,61	44,86	41,87
		макс	20,01	21,02	45,52	42,64
	Мінімальний коефіцієнт запасу міцності FOS (МПа/МПа)		за Мізесом	9,23	7,08	1,92
на розтяг			8,86	6,94	1,86	2,37
на зсув			8,99	6,90	1,87	2,37
мін			8,86	6,90	1,86	2,37

Таблиця 5 – Результати моделювання: об’ємний нагрів

Параметри/склади		Час	РПК-С	РПК-Ц	РПК-ЦС	РПК-СВ
Переміщення точки конструкції (мкм)		7с	140,54	143,29	310,71	265,89
		макс	171,55	184,14	383,92	335,15
Напруження за Мізесом (МПа)		7с	58,82	59,07	133,54	126,24
		макс	59,03	59,30	132,85	125,61
Головні напруження (МПа)	$\sigma_1$	7с	51,33	48,19	114,11	74,21
		макс	51,52	48,39	113,58	73,92
		мін	–	–	–	–
	$\sigma_3$	7с	-58,57	-59,19	-132,84	-126,65
		макс	–	–	–	–
		мін	-58,79	-59,43	-132,16	-126,03
	$Z_{суб}$	7с	29,75	30,10	67,50	64,38
		макс	29,86	30,22	67,15	64,06
	Мінімальний коефіцієнт запасу міцності FOS (МПа/МПа)		за Мізесом	6,10	4,89	1,28
на розтяг			6,99	5,99	1,50	1,92
на зсув			6,03	4,80	1,27	1,58
мін			6,03	4,80	1,27	1,58

З розрахунків максимальних напружень, що виникають в складнопрофільному виробі під час польоту, видно, що славсонітова кераміка має найменші значення напружень вздовж всього розрахункового часу. За результатами моделювання також визначені коефіцієнти запасу міцності для розглянутих складнопрофільних виробів при об’ємному та поверхневому нагріві.

Результати моделювання показали, що максимальні переміщення точки конструкції моделі (як параметру, який характеризує жорсткість конструкції) не перевищують 0,3 мм для поверхневого нагріву і 0,4 мм для об’ємного нагріву, що є прийнятним відносно заданих параметрів матеріалів. Максимальні напруження є меншими, ніж значення межі міцності при згині досліджених серій керамічних зразків. Визначено, що значення мінімального коефіцієнту запасу міцності (FOS, Factor of Safety) є більшими для однофазних керамічних матеріалів, а не багатофазних матеріалів та твердих розчинів, і становить для славсоніту та цельзіану 8,86 та 6,90 (поверхневий нагрів), 6,03 та 4,80 (об’ємний нагрів). Отже, складнопрофільний виріб, виготовлений з радіопрозорої кераміки на основі складів РПК-С та РПК-Ц не зазнаватиме миттєвого руйнування в реальних умовах експлуатації.

Проведена оцінка хімічної стійкості кераміки цельзіанового, славсонітового та цельзіан-славсонітового складів шляхом термодинамічного аналізу реакцій взаємодії фаз з кислотними ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ) та лужними ( $NaOH$ ,  $Na_2CO_3$ ) реагентами. Експериментально підтверджено, що матеріали виявляють високу хімічну стійкість до дії стандартних лужних розчинів  $NaOH$ ,  $Na_2CO_3$  (99,92...99,98 %). По відношенню до стандартних розчинів

кислот ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ) стійкість керамічних проб змінюється в інтервалі 98,24...99,58 %. Також досліджені серії зразків (РПК-Ц, РПК-С, РПК-ЦС) продемонстрували високі показники водостійкості по відношенню до морської води (водостійкість складає до 100 %). Вивчення мікроструктури та фазового складу керамічних зразків після обробки реагентами показали, що у всіх досліджених зразках присутні тільки вихідні кристалічні фази, тобто процесу хімічної корозії дослідного матеріалу не відбувається.

За результатами експериментального визначення вогнетривкості дослід-них зразків методом падіння конусу для цельзіанової, славсонітової та цельзіан-славсонітової кераміки можна зробити висновок, що вироби, виготовлені на основі цих матеріалів, будуть зберігати свою цілісність та працездатність за максимальної температури експлуатації 1500 °С. Щодо славсоніт-віллемітової кераміки, то її максимальна температура експлуатації не перевищує 1100 °С.

Проведені експериментальні дослідження діелектричних та електродинамічних властивостей розроблених керамічних матеріалів складів РПК-С, РПК-Ц, РПК-ЦС та РПК-СВ у діапазоні частот 26...37,5 ГГц. Встановлено, що усі розроблені матеріали задовольняють основні вимоги, що висуваються до радіопрозорої кераміки і характеризуються такими значеннями властивостей: коефіцієнт передачі радіохвиль  $k_{\text{пер}} = 0,3...0,7$  (амплітудний  $k_{\text{пер}(a)} = -5,8...-1,9$  дБ);  $\varepsilon = 4,4...5,7$ ;  $\text{tg}\delta = 0,005...0,013$ . Досліджені характеристики проявляють стабільність значень в частотному діапазоні радіохвиль 26...37,5 ГГц, що є необхідною умовою надійного функціонування виробів для авіакосмічної техніки з радіопрозорої кераміки.

**В цьому розділі** представлені результати практичної апробації розробленої технології та випробувань радіопрозорої кераміки, виготовленої в умовах ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля, науково-виробничого підприємства «Кварцит» ДК «Укроборонпром», ТОВ «Радіонікс». Практична апробація проведена з позитивними результатами, що підтверджується відповідними актами. Виготовлені експериментальна та дослідна-промислова партії матеріалів в умовах НТУ «ХП» і ТОВ «Радіонікс», які відповідають вимогам до фізико-механічних та діелектричних властивостей радіопрозорої кераміки (табл. 6).

Радіопрозорі керамічні матеріали на основі складів РПК-С, РПК-Ц та РПК-ЦС можуть бути використані при виробництві елементів захисних конструкцій антенного обладнання авіаційних об'єктів. Розроблена кераміка складу РПК-СВ придатна до використання в елементах авіаційних об'єктів, що зазнають термічних навантажень не вище 1100 °С.

Розроблені та затверджені проекти технічної документації (технічні умови, технологічний регламент виробництва, технологічна інструкція на виготовлення матеріалів).

Таблиця 6 – Властивості розроблених керамічних матеріалів

Властивості	РПК-С	РПК-Ц	РПК-ЦС	РПК-СВ	Вимоги до радіопрозорих керамічних матеріалів
Водопоглинання, %	0,65	1,3	0,9	0,5	< 1,5
Уявна густина, кг/м <sup>3</sup>	2750	2650	3000	2910	2700...3200
Межа міцності при згині, МПа	360	270	175	201	> 70,0
Діелектрична проникність	4,7...4,8	4,4...4,6	5,6...5,7	5,2...5,4	< 10
Тангенс кута діелектричних втрат	0,006... 0,008	0,005... 0,007	0,010... 0,013	0,008... 0,011	< 0,015
Температура експлуатації, °С	1500	1500	1500	1100	< 1000

Отримані наукові та практичні результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» і використовуються при викладанні дисциплін: «Хімічна технологія тонкої і технічної кераміки», «Інноваційні матеріали і технології в технології тугоплавких неметалевих силікатних матеріалів» та «Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів». Результати проведених в роботі досліджень мають практичну значимість при підготовці здобувачів I – III кваліфікаційних рівнів освіти за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія» згідно з відповідними освітньо-професійною та освітньо-науковими програмами.

**У додатках** наведені: список публікацій здобувача, акти впровадження результатів дисертаційних розробок, акти випуску експериментальної і дослідно-промислових партій виробів, проекти розробленої технічної документації, акт впровадження результатів дослідження в навчальний процес.

## ВИСНОВКИ

За результатами виконання дисертаційної роботи вирішено важливу науково-практичну проблему розроблення теоретичних основ і технології радіопрозорих керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки на основі алюмосилікатних систем, в яких проходить синтез цільових фаз, здатних забезпечити комплекс необхідних електрофізичних, електродинамічних і техніко-експлуатаційних характеристик кераміки. Комплекс теоретичних та експериментальних досліджень дозволив сформулювати наступні загальні висновки.

1. Теоретичні принципи отримання радіопрозоної кераміки базуються на термодинамічно вигідному співіснуванні заданих фаз та їх комбінацій в

субсолідусній частині системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>, а саме алюмосилікатів стронцію, барію та силікату цинку.

2. З використанням розрахованих термодинамічних констант алюмосилікатів стронцію досліджено субсолідусну будову трикомпонентних систем SrO – BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> і чотирикомпонентних систем BaO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> та SrO – ZnO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> з урахуванням стабільних фаз до температури 1700 К. Визначені області складів, перспективні для створення радіопрозорої кераміки на основі цільових фаз цельзіану та славсоніту (в межах перерізів BaS<sub>2</sub> – SrAS<sub>2</sub> – SrS, SrAS<sub>2</sub> – Sr<sub>2</sub>AS – BaS<sub>2</sub>, SrAS<sub>2</sub> – BaS<sub>2</sub> – A<sub>3</sub>S<sub>2</sub>, SrAS<sub>2</sub> – BaS<sub>2</sub> – SrA<sub>2</sub>, A – SrAS<sub>2</sub> – BaS<sub>2</sub>) та на основі комбінацій славсоніту та віллеміту (S – ZA – Z<sub>2</sub>S – SrAS<sub>2</sub>, S – Sr<sub>2</sub>ZS<sub>2</sub> – Z<sub>2</sub>S – SrAS<sub>2</sub>).

3. Розроблені оксидні і сировинні композиції для спрямованого синтезу цільових фаз за знижених температур. Склади мас для отримання монофазної кераміки на основі систем SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> та BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> відповідають стехіометричному співвідношенню славсоніту та цельзіану і забезпечують після випалу за температури 1350 °С рівень діелектричної проникності при 1 кГц (відповідно 5,98 та 6,5), що є умовою радіопрозорості матеріалів. Раціональний склад цельзіан-славсонітової кераміки, що відповідає співвідношенню BaS<sub>2</sub> : SrAS<sub>2</sub> = 1 : 3, за температури випалу 1450 °С забезпечує діелектричну проникність на рівні 9,7. Натомість, для гетерофазної славсоніт-віллемітової кераміки зі співвідношенням цільових фаз 1 : 1 показник діелектричної проникності становить 5,96. Доведена необхідність використання технічної сировини для попередження негативного впливу домішок на діелектричні характеристики матеріалів.

4. Встановлені механізми утворення цільових сполук при отриманні моно- і гетерофазних керамік. Доведена можливість двох шляхів утворення славсоніту: за участі силікатів стронцію або розкладанні Sr-геленіту. Показано, що формування славсоніту за участі Sr<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> та SrSiO<sub>3</sub> є більш енергетично вигідним, оскільки дозволяє суттєво знизити температуру синтезу (до 1200 °С). Необхідною умовою низькотемпературного синтезу цельзіану (починаючи з 1000 °С) є реакція глинозему з BaSiO<sub>3</sub>, який утворюється при взаємодії ортосилікату барію та кварцу. Отримання монофазної славсоніт-цельзіанової кераміки раціонального складу обумовлено формуванням ряду твердих розчинів, склад яких поступово змінюється від Ba<sub>0,75</sub>Sr<sub>0,25</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> до Ba<sub>0,25</sub>Sr<sub>0,75</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> за температури 1135 °С по мірі розкладання карбонату стронцію. Доведено, що утворення твердих розчинів за участю барію унеможливорює утворення високотемпературного Sr-геленіту, що дозволяє знизити температуру синтезу радіопрозорої кераміки. Формування славсоніт-віллемітової кераміки відбувається внаслідок утворення

віллеміту ( $Z_2S$ ) та синтезу силікатів стронцію в інтервалі температур 860...1000 °C, що, як було показано вище, є необхідною умовою низькотемпературного синтезу славсоніту від 1120 °C та паралельного формування віллеміту, починаючи з температури 900 °C.

5. Встановлена можливість інтенсифікації процесів фазоутворення та спікання кераміки з використанням малих добавок ( $SnO_2$ ,  $Li_2O$ ,  $SnO_2 : Li_2O$ ). Визначені вид і кількість добавок, що забезпечують максимальну повноту утворення цільових фаз, формування тонкокристалічної структури матеріалів із середнім розміром кристалів до 5 мкм та високий рівень спікання виробів (водопоглинання 0,6...2 %) за знижених температур: для монофазних керамік 1,5 мас. % евтектичної добавки  $SnO_2 : Li_2O$  (1350 °C); для гетерофазної кераміки – 4 мас. % калішпату (1150 °C).

6. Досліджені основні стадії технологічного процесу виготовлення радіопрозорої кераміки для визначення факторів впливу на властивості технологічних сумішей, напівфабрикатів і готових матеріалів, а також їх структуру з метою опрацювання виробничих параметрів двостадійної технології виробів складної конфігурації (синтез цільових фаз у матеріалі-напівфабрикаті, кінцевий випал матеріалу). Відпрацьовані і рекомендовані технологічні параметри виробництва складнопрофільних виробів з розроблених видів радіопрозорої кераміки, які відрізняються в частині температур синтезу цільових фаз та випалу виробів: для славсонітової кераміки РПК-С, цельзіанової кераміки РПК-Ц та цельзіан-славсонітової кераміки РПК-ЦС вони становлять відповідно 1250 °C і 1350 °C, для славсоніт-віллемітової кераміки РПК-СВ – 1150 °C і 1200 °C.

7.3 Використанням методу скінченних елементів змодельована поведінки складнопрофільних виробів, виготовлених з розроблених радіопрозорих керамічних матеріалів в умовах, наближених до реальних. За результатами розрахунків параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану моделей показано, що в розглянутих умовах максимальні переміщення точки конструкції (як параметру, який характеризує її жорсткість) не перевищують 0,3 мм для поверхневого нагріву і 0,4 мм для об'ємного нагріву, що є прийнятним відносно заданих параметрів складнопрофільних виробів. Максимальні напруження не перевищують значень меж міцності при згині для розроблених матеріалів. Величина мінімального коефіцієнту запасу міцності при поверхневому нагріві для цельзіан-славсонітової та славсоніт-віллемітової керамік становить 1,86 і 2,37, а для славсонітової і цельзіанової керамік – 8,86 та 6,90 відповідно. Отже складнопрофільні вироби, виготовлені з керамік РПК-С та РПК-Ц з більшою вірогідністю здатні витримувати реальні навантаження в складних умовах експлуатації.

За результатами прогнозової оцінки хімічної стійкості матеріалів,

підтвердженої експериментально за втратами їх ваги та даними РФА, встановлена висока витривалість розроблених монофазних керамік відносно дії стандартних лужних розчинів NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (99,92...99,98 %), розчинів кислот H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HCl (98,24...99,58 %) та морської води (~100%).

8. Керамічні вироби, виготовлені за рекомендованими технологічними параметрами, мають наступні характеристики, які відповідають вимогам до радіопрозорих матеріалів (при частоті 26...37,5 ГГц):

- славсонітова кераміка РПК-С: водопоглинання – 0,65 %, уявна густина – 2750 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 1,55 %, межа міцності при згині – 360 МПа, вогнетривкість – 1640 °С, діелектрична проникність – 4,7...4,8, тангенс кута діелектричних втрат – 0,006...0,008, коефіцієнт передачі радіохвиль  $k_{\text{пер}} = 0,4...0,6$  (амплітудний  $k_{\text{пер}(a)} = -4,7...-2,5$  дБ);
- цельзіанова кераміка РПК-Ц: водопоглинання – 1,3 %, уявна густина – 2650 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 2,1 %, межа міцності при згині – 270 МПа, вогнетривкість – 1690 °С, діелектрична проникність – 4,4...4,6, тангенс кута діелектричних втрат – 0,005...0,007,  $k_{\text{пер}} = 0,4...0,5$  (амплітудний  $k_{\text{пер}(a)} = -4,8...-2,9$  дБ);
- цельзіан-славсонітова кераміка РПК-ЦС: водопоглинання – 0,9 %, уявна густина – 3000 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 0,7 %, межа міцності при згині – 175 МПа, вогнетривкість – 1670 °С, діелектрична проникність – 5,6...5,7, тангенс кута діелектричних втрат – 0,010...0,013,  $k_{\text{пер}} = 0,3...0,7$  (амплітудний  $k_{\text{пер}(a)} = -5,6...-1,9$  дБ);
- славсоніт-віллемітова кераміка РПК-СВ: водопоглинання – 0,5 %, уявна густина – 2910 кг/м<sup>3</sup>, відкрита пористість – 1,7 %, межа міцності при згині – 201 МПа, вогнетривкість – 1240 °С, діелектрична проникність – 5,2...5,4, тангенс кута діелектричних втрат – 0,008...0,011,  $k_{\text{пер}} = 0,3...0,6$  (амплітудний  $k_{\text{пер}(a)} = -5,8...-2,3$  дБ).

9. Проведена практична апробація запропонованих технологій в умовах провідних вітчизняних установ, які працюють у відповідному науковому напрямку. З позитивними результатами проведені випробування матеріалів в умовах ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля, науково-виробничого підприємства «Кварсит» ДК «Укроборонпром», ТОВ «Радіонікс» та НТУ «ХПІ», що підтверджується відповідними актами. Радіопрозорі керамічні матеріали РПК-С, РПК-Ц та РПК-ЦС з робочою температурою експлуатації до 1500 °С рекомендовані для використання у виробництві елементів захисних конструкцій антенного обладнання авіаційних об'єктів. Розроблена кераміка РПК-СВ придатна до використання в елементах авіаційних об'єктів, що зазнають термічних навантажень не вище 1100 °С. Розроблені та затверджені проекти технічної

документації на виготовлення матеріалів і виробів з них (технічні умови, технологічний регламент виробництва, технологічна інструкція).

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені в навчальний процес кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» при підготовці здобувачів I – III кваліфікаційних рівнів освіти за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія» згідно з відповідними освітньо-професійною та освітньо-науковими програмами.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Федоренко О.Ю., Захаров А.В., Чефранов Є.В., Приткіна М.С., Ревуцький В.І. Особливості синтезу радіопрозорої кераміки із заданими радіофізичними властивостями. *Збірник наукових праць ПАТ «УкрНДІ Вогнетривів ім. А. С. Бережного»*. 2014. № 114. С. 133–144. (кат. «Б»).

*Здобувачем проаналізовані параметри і особливості синтезу радіопрозорої кераміки у взаємозв'язку з властивостями.*

2. Lisachuk G.V., Bilostotska L.O., Trusova Yu.D., Vernygora K.P., Podchasova K.V., Kryvobok R.V. Directed phase formation of functional glass-crystalline coatings for ceramics in  $TiO_2-Al_2O_3-SiO_2$  system *Functional Materials*. 2015. Vol. 22. No 4. P. 547–551. (кат. «А», Scopus).

*Здобувачем вивчений вплив мінералізатора (діоксиду стануму) на синтез кристалічних фаз.*

3. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Fedorenko E.Y., Zakharov A.V., Prytkina M.S. Thermodynamic analysis of solid phase reactions in  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  system. *Functional Materials*. 2016. Vol. 23. No 1. P. 71–74. (кат. «А», Scopus).

*Здобувачем в системі  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  за допомогою термодинамічного методу аналізу показана перспективність отримання славсоніту з різних сировинних матеріалів.*

4. Lisachuk G., Kryvobok R., Bilostotska L., Trusova Y., Pavlova L., Podchasova K. Effect of modified glass matrices on the strengthening of glass crystalline coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4. № 6 (82). P. 44–49. (кат. «А», Scopus).

*Здобувачем експериментально досліджений вплив концентрації модифікаторів ( $ZnO$ ,  $TiO_2$ ,  $SnO_2$ ) на фазові перетворення в процесі термічної обробки кераміки.*

5. Пітак Я.М., Лісачук Г.В., Подчасова К.В., Білостоцька Л.О.,

Трусова Ю.Д., Кривобок Р.В. Дослідження субсолідусної будови системи  $ZnO - Al_2O_3 - TiO_2 - SiO_2$ . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2. № 6. P. 71–76. (кат. «А», Scopus).

*Здобувачем розраховані та проаналізовані геометро-топологічні характеристики фаз субсолідусної частини системи  $ZnO - TiO_2 - SiO_2$*

6. Lisachuk G., Kryvobok R., Zakharov A., Tsovma V., Lapuzina O. Influence of complex activators of sintering on creating radiotransparent ceramics in  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1. № 6. P. 10–15. (кат. «А», Scopus).

*Здобувачем визначений вплив інтенсифікаторів спікання на низькотемпературну активацію процесу синтезу стронцієвого анортиту і отримання цільноспеченого керамічного матеріалу.*

7. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov E.V., Lisachuk L.N. Development of new compositions of ceramic masses in  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  system. *Functional Materials*. 2017. Vol. 24. No. 1. P. 162–167. (кат. «А», Scopus).

*Здобувачем розроблений склад радіопрозорі кераміки з низькими значеннями діелектричних характеристик на основі нестехіометричних оксидних композицій.*

8. Пітак Я.М., Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Волощук В.В., Чефранов Є.В., Майстат М.С. Дослідження впливу технологічних параметрів на властивості цельзіан-славсонітової кераміки. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки. Збірник наукових праць*. 2019. № 119. С. 82–88. (кат. «Б»).

*Здобувачем досліджено фазовий склад та мікроструктуру отриманої радіопрозорі кераміки.*

9. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Волощук В.В., Лісачук Л.М., Чефранов Є.В. Дослідження впливу інтенсифікуючих добавок на низькотемпературний синтез славсоніту та цельзіану при створенні радіопрозорих керамічних матеріалів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2020. № 2 (4). С. 68–74. (кат. «Б»).

*Здобувачем досліджений вплив ряду добавок на інтенсифікацію низькотемпературного синтезу славсоніту та цельзіану.*

10. Лісачук Г.В., Пітак Я.М., Кривобок Р.В., Чефранов Є.В., Майстат М.С., Волощук В.В., Лимаренко Л.С. Технологія шлікерного лиття цельзіан-славсонітової кераміки. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки. Збірник наукових праць*. Харків, 2020. № 120. С. 151–159. (кат. «Б»).

*Здобувачем встановлені фізико-механічні властивості кераміки на основі системи  $BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ , отриманої методом лиття,*

досліджені реологічні властивості шлікера.

11. Lisachuk G., Kryvobok R., Fedorenko O., Zakharov A., Prytkina M. Subsolidus structure of the  $ZnO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  system as a base for designing radio-transparent ceramics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 6. No 6 (108). P. 6–14. (кат. «А», Scopus).

Здобувачем розроблена технологія поліфазної радіопрозорі кераміки на основі системи  $ZnO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

12. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Масаликін Р.А., Кривобок Н.А. Хімічна стійкість цельзіанової кераміки у кислотному та лужному реагентах. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки. Збірник наукових праць*. Харків, 2021. № 121. С. 129–139. (кат. «Б»).

Здобувачем досліджена хімічна стабільність цельзіанової кераміки, отриманої за різних температур випалу, та вивчені її структурно-фазові особливості до та після взаємодії з лужними та кислотними середовищами.

13. Podbolotov K.B., Volochko A.T., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Voloshchuk V.V. Exothermic synthesis of ceramic materials based on barium and strontium. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. No 6. P. 57–64. (кат. «А», Scopus).

Здобувачем встановлені закономірності низькотемпературного синтезу кераміки в системі  $RO (R = Ba, Sr) - Al_2O_3 - SiO_2$ .

14. Lisachuk G., Kryvobok R., Zakharov A., Voloshchuk V., Maistat M., Hlinskyi D., Kolovorotnyi B. Influence of the firing temperature on the dielectric properties of ceramics based on barium titanate. *Technology Audit and Production Reserves*. 2021. Vol. 5. No 3 (61). P. 10–13. (кат. «Б»).

Здобувачем розроблений план експерименту та проведена обробка експериментальних даних.

15. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Шумейко В.М., Тур Ю.І., Волощук В.В. Термодинамічний аналіз хімічної стійкості керамічних матеріалів на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ . *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 2. С. 33–44. (кат. «Б»).

Здобувачем проведений термодинамічний аналіз хімічної стійкості керамічних матеріалів на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

16. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В. Технологія виробництва радіопрозорих керамічних матеріалів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2023. № 2 (16). С. 63–69. (кат. «Б»).

Здобувачем розроблена технологія виробництва радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

**Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:**

17. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Fedorenko O.Yu., Zakharov A.V. Ceramic radiotransparent materials on the basis of  $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  and  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  systems. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2015. Vol. 67. No 1. P. 20–23. **(WoS, Угорщина)**.

*Здобувачем здійснений обґрунтований вибір керамічних матеріалів з низькими значеннями діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат. Визначені склад і технологічні параметри одержання цельзіанової та славсонітової кераміки з низькими значеннями діелектричних властивостей.*

18. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Dajneko K.B., Zakharov A.V., Fedorenko E.Y., Prytkina M.S., Chefranov Y.V., Annabaev A., Kisała P., Mussabekov K., Romaniuk R. Optimization of the compositions area of radiotransparent ceramic in the  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  system. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017. Vol. 93. No 3. P. 79–82. **(Scopus, Польща)**.

*Здобувачем проведена оптимізація області складів радіопрозорі кераміки.*

19. Lisachuk G., Kryvobok R., Pitak Y., Lapuzina O., Gusarova I., Lisachuk L., Grebenyuk A. Ceramics with adjustable dielectric properties based on the system  $SrO - TiO_2 - SiO_2$ . *Przegląd Elektrotechniczny*. 2018. Vol. 94. No 1. P. 163–166. **(Scopus, Польща)**.

*Здобувачем опрацьована методика вивчення діелектричних властивостей стосовно дослідної кераміки.*

20. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov E.V., Lapuzina O.M., Voloshchuk V.V., Samoilenko N.N. Technological parameters of ceramics creation on the basis of slavsonite. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2019. Vol. 71. No 2. P. 46–51. **(WoS, Угорщина)**.

*Здобувачем з використанням методу факторного експерименту розроблені технологічні параметри виготовлення керамічних виробів простої форми, здатних виконувати функції захисних радіопрозорих елементів конструкцій.*

21. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Fedorenko O.Yu., Voloshchuk V.V., Zhadko M.A., Sarai V.V. Rheological properties of a slip based on synthesized slavsonite and properties of ceramic materials based on it. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2021. Vol. 73. No 2. P. 68–71. **(WoS, Угорщина)**.

*Здобувачем встановлені закономірності формування кераміки на основі системи  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ , отриманої методом лиття в гіпсові форми, а також досліджені реологічні властивості шлікера.*

22. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Voloshchuk V.V., Lapuzina O.M.

Investigation of the influence of temperature-time regimes on the morphological features of slawsonite. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2022. Vol. 74. No. 6. P. 224–228. **(WoS, Угорщина)**.

*Здобувачем досліджений фазовий склад отриманої кераміки.*

23. Bilohubkina K.V., Fedorenko O.Yu., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V. Influence of aluminum-containing raw materials on the properties of radio-transparent materials. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2023. Vol. 75. No. 3. P. 84–87. **(WoS, Угорщина)**.

*Здобувачем експериментально відпрацьовано методи вивчення мікроструктури радіопрозорої кераміки на основі віллеміту.*

**Монографії та розділи в колективних монографіях:**

24. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Федоренко О.Ю., Захаров А.В., Богданова К.Б. Електротехнічна кераміка на основі алюмосилікатів лужних та лужноземельних металів : монографія. Харків : ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 200 с.

*Здобувачем узагальнені та представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень щодо отримання радіопрозорої кераміки на основі системи  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

25. До питання про створення радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$  / Г.В. Лісачук, Р.В. Кривобок, С.В. Зінченко, Я.М. Пітак, А.В. Захаров, В.В. Волощук, Є.В. Чефранов, М.С. Майстат. *Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони* : колективна монографія / за заг. ред. проф. А.П. Марченка. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2021. С. 95–128.

*Здобувачем узагальнені результати експериментальних досліджень з розробки технологічних параметрів отримання радіопрозорої кераміки на основі твердого розчину барій-стронцієвого анортиту.*

26. Теоретичні передумови створення радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи  $BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  / Г.В. Лісачук, Р.В. Кривобок, Є.В. Чефранов, В.В. Волощук. *Achievements of Ukraine and the EU in ecology, biology, chemistry, geography and agricultural sciences* : collective monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2021. Vol. 2. P. 282–318.

*Здобувачем здійснений термодинамічний аналіз реакцій утворення цельзіану та славсоніту з використанням технічних продуктів, визначені найбільш вірогідні шляхи їх синтезу.*

27. Технологічні особливості отримання радіопрозорої кераміки на основі славсоніту / Г.В. Лісачук, Р.В. Кривобок, В.В. Волощук. *Resource- and energy-saving technologies in the chemical industry* : scientific monograph. Riga, Latvia: «Baltija Publishing», 2022. P. 85–101.

*Здобувачем досліджені структурно-фазові особливості славсонітової радіопрозорої кераміки у взаємозв'язку з технологічними параметрами її отримання і властивостями.*

28. Вивчення електрофізичних властивостей цельзіанової кераміки в НВЧ діапазоні / Г.В. Лісачук, В.В. Григоруk, В.В. Олійник, Р.В. Кривобок, В.В. Волощук. *Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології* : монографія. Луцьк: Волинський національний університет ім. Лесі Українки, 2022. С. 261–270.

*Здобувачем досліджено стабільність електрофізичних характеристик кераміки на основі системи  $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  в мікрохвильовому діапазоні.*

**Статті у наукових виданнях, які додатково відображають результати дисертації:**

29. Захаров А.В., Кривобок Р.В., Лісачук Г.В., Федоренко О.Ю., Рябінін О.С., Приткіна М.С. Теоретичні та технологічні принципи отримання радіопрозорих керамічних матеріалів у системі  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ . *Збірник наукових праць ПАТ «УкрНДІ Вогнетривів ім. А.С. Березного»*. 2015. № 115. С. 83–93.

*Здобувачем експериментально доведена можливість низькотемпературного синтезу славсоніту.*

30. Григоруk В.І., Олійник В.В., Лаунець В.Л., Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Карпутін Б.А. Електродинамічні характеристики кераміки на основі системи  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  в мікрохвильовому діапазоні. *Журнал нано- та електронної фізики*. 2017. Том 9. № 5. С. 05014-1–05014-5.

*Здобувачем вивчені електродинамічні характеристики радіопрозорої кераміки стехіометричного складу в широкому частотному діапазоні.*

31. Лісачук Г.В., Ткачук М.А., Васильєв А.Ю., Бреславський Д.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В. Розрахунок параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану виробів з цельзіанової кераміки. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2023. № 1. С. 35–43.

*Здобувачем досліджена поведінка виробів з цельзіанової кераміки в умовах, наближених до експлуатаційних.*

**Об'єкти інтелектуальної власності:**

32. Пат. 96524 Україна, МПК С04В 35/44 (2006.01). Радіопрозорий керамічний матеріал / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Федоренко О.Ю.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». № u201409217; заявл. 18.08.2014; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3/2015. 4 с.

*Здобувачем розроблений спосіб виготовлення радіопрозорої кераміки на основі системи  $BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

33. Пат. 100087 Україна, МПК С04В 35/44 (2006.01). Радіопрозорий керамічний матеріал / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Резинкін О.Л., Ревуцький В.І., Колчигін М.М., Іванченко Д.Д., Лісачук Л.М.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». № u201500048; заявл. 05.01.2015; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 13/2015. 4 с.

*Здобувачем розроблений спосіб виготовлення радіопрозорої кераміки на основі системи  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

34. Пат. 107389 Україна, МПК С04В 35/00. Керамічна маса для виготовлення радіопрозорої кераміки / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Федоренко О.Ю., Дайнеко К.Б., Приткіна М.С.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». № u201508334; заявл. 25.08.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. № 11/2016. 5 с.

*Здобувачем розроблений раціональний склад композицій для виготовлення радіопрозорої кераміки на основі системи  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

35. Пат. 112522 Україна, МПК С04В 35/00. Маса для виготовлення радіопрозорої кераміки / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Федоренко О.Ю., Цовма В.В., Чефранов Є.В., Приткіна М.С.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». № u201605065; заявл. 06.05.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24/2016. 5 с.

*Здобувачем запропонований склад маси для виготовлення радіопрозорої славсонітової кераміки за зниженої температури термічної обробки.*

36. Пат. 118344 Україна, МПК С04В 35/44 (2006.01). Керамічна маса для виготовлення радіопрозорої кераміки / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Гусарова І.О., Карпікова О.О., Лісачук Л.М.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». № u201612324; заявл. 05.12.2016; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15/2017. 5 с.

*Здобувачем запропонований склад сировинної композиції для виготовлення радіопрозорої кераміки на основі системи  $BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

37. Пат.136860 Україна, МПК С04В 35/115 (2006.01) С04В 35/47 (2006.01) С04В 35/528 (2006.01) С04В 35/66 (2006.01) С04В 35/82 (2006.01). Маса для виготовлення радіопрозорої кераміки / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Пітак Я.М., Захаров А.В., Чефранов Є.В., Волощук В.В.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». № u201902810; заявл. 21.03.2019; опубл. 10.09.2019, Бюл. № 17/2019. 5 с.

*Здобувачем запропонований спосіб виготовлення радіопрозорої кераміки на основі системи  $SrO - Al_2O_3 - SiO_2$  з використанням інтенсифікаторів фазоутворення.*

38. Пат. на винахід 124213 Україна, МПК С04В 35/195 (2006.01), С01В 33/26(2006.01). Маса для виготовлення радіопрозорої кераміки /

Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Федоренко О.Ю., Захаров А.В., Щукіна Л.П., Шуба І.В., Чефранов Є.В., Сарай В.В.; заявник та патентовласник НТУ «ХП». № а201911237; заявл. 18.11.2019; опубл. 05.08.2021, Бюл. № 31/2021. 6 с.

*Здобувачем розроблений склад маси для виготовлення радіопрозорої кераміки на основі системи  $BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  з використанням евтектичної добавки.*

39. Пат. 150990 Україна, МПК C04B 35/14 (2006.01), H01B 3/02 (2006.01). Спосіб виготовлення виробів складної форми з радіопрозорого керамічного матеріалу на основі славсоніту / Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Федоренко О.Ю., Захаров А.В., Волощук В.В.; заявник та патентовласник НТУ «ХП». № u202107495; заявл. 22.12.2021; опубл. 18.05.2022, Бюл. № 20/2022. 4 с.

*Здобувачем розроблений спосіб виготовлення виробів складної форми з радіопрозорого матеріалу на основі славсоніту.*

#### ***Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***

40. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Чефранов Є.В. Радіопрозора кераміка для авіатехніки на основі цельзіану та стронцієвого анортиту. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : матеріали XXII Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022. Харків: НТУ «ХП», 2014. Ч. II. С. 286.

*Здобувачем досліджені фізико-механічні характеристики радіопрозорої кераміки.*

41. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Fedorenko E.Y. Prospects for creation of ceramic radiotransparent materials. *Summer school and international research and practice conference: Nanotechnology and nanomaterials NANO-2014* : conference materials. Lviv, 2014. P. 205–206.

*Здобувачем розроблений план експерименту, та проведені обробка та аналіз експериментальних даних.*

42. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Федоренко О.Ю., Захаров А.В. Кераміка для створення високотемпературних радіопрозорих матеріалів. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. Львів, 2015. С. 110.

*Здобувачем досліджено технології створення радіопрозорих матеріалів на основі кристалічних фаз з температурою плавлення понад 1500 °С.*

43. Кривобок Р.В., Захаров А.В., Приткіна М.С., Чефранов Є.В. Фазовий склад та властивості радіопрозорої кераміки на основі системи  $BaO(ZnO) - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ . *Проблеми та досягнення сучасної хімії* : матеріали XVIII Наукової молодіжної конференції. Одеса: Фізико-хімічний інститут ім. О.В. Богатського, 2016. С. 34.

*Здобувачем досліджений фазовий склад радіопрозорої кераміки.*

44. Kryvobok R., Lisachuk G., Chefranov E., Zakharov A. Development of radiotransparent ceramic based on composition of the system BaO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>. *The American Ceramic Society Electronic Materials and Applications 2017* : abstract book. Orlando, Florida. 2017. P. 27.

*Здобувачем експериментально досліджено властивості керамічних матеріалів на основі твердих розчинів цельзіану та славсоніту.*

45. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Chefranov E.V., Lapuzina O.M., Korablova P.S., Krasnyuk I.G. The structure and phase composition of the radiotransparent ceramics. *Chemistry, Physics and Technology of Surface* : materials Proceedings of Ukrainian Conference with International participation. Kyiv: Chuiko Institute of Surface Chemistry. 2017. P. 92.

*Здобувачем досліджена мікроструктура радіопрозорої кераміки.*

46. Voloshchuk V.V., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Limarenko L.S., Vabishchevich P.P. Technology for the production of complex products based on celsian ceramics. *Ukrainian Conference with International Participation Chemistry, Physics and Technology of Surface*: conference materials. Kyiv, 2019. P. 202.

*Здобувачем вивчений вплив технологічних параметрів на властивості цельзіанової кераміки.*

47. Пітак Я.М., Лісачук Г.В., Волощук В.В., Вабіщевіч П.П., Рябініна А.С., Кривобок Р.В., Захаров А.В. Дослідження властивостей цельзіанового шлікера для радіопрозорої кераміки. *Фізико-хімічні проблеми в технології тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів АТ «УкрНДІ Вогнетривів ім. А.С. Бережного»* : тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2020. С. 50–52.

*Здобувачем досліджені реологічні властивості шлікера для виготовлення цельзіанової кераміки.*

48. Voloshchuk V.V., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov Ye.V., Sarai V.V. Technology of obtaining complex products based on celsian by the method of slip casting. *Proceedings of Ukrainian Conference with International participation "Chemistry, Physics and Technology of Surface" dedicated to the 90th birthday of Aleksey Chuiko* : conference materials. Kyiv: Academician of NAS of Ukraine, 2020. P.192.

*Здобувачем розроблена технологія отримання складнопрофільних радіопрозорих виробів на основі цельзіанової кераміки.*

49. Волощук В.В., Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Вабіщевіч П.П., Лимаренко Л.С., Рябініна А.С. Дослідження властивостей радіопрозорих керамічних обтікачів, отриманих методом лиття водних суспензій. *Теоретичні та практичні дослідження молодих науковців* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів.

Харків: НТУ «ХПІ», 2020. С. 380.

*Здобувачем розроблена технологія отримання складнопрофільних радіопрозорих виробів на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

50. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Пітак Я.М., Захаров А.В., Волощук В.В., Бреславський Д.В., Сенько А.В. Вивчення стаціонарної теплопровідності та напружено-деформованого стану керамічних обтічників. *Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології* : матеріали І-ї Міжнародної наукової конференції. Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2021. С. 155–156.

*Здобувачем вивчені теплофізичні властивості кераміки на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

51. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Рябініна А.С., Масаликін Р.А., Тимченко О.Р. Дослідження хімічної стійкості цельзіанової кераміки. *Технологія та застосування вогнетривів і технічної кераміки у промисловості*: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Харків: ДІСА ПЛЮС, 2021. С. 28–29.

*Здобувачем вивчена хімічна стійкість цельзіанової кераміки.*

52. Voloshchuk V.V., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Ryabinina A.S., Tymchenko A.R., Masalykin R.A. Investigation of the influence of technological parameters on the morphological features of celsian ceramics. *The International research and practice conference “Nano-technology and nanomaterials” (NANO-2021)* : Abstract Book of participants of the International research and practice conference. Kyiv: LLC «Computer-publishing, information center», 2020. P. 286.

*Здобувачем вивчена мікроструктура цельзіанової кераміки.*

53. Voloshchuk V.V., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov Ye.V. Technology of creating ceramic materials based on the system  $BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ . *Proceedings of Ukrainian Conference with International Participation «Chemistry, Physics and Technology of Surface» devoted to the 35th anniversary of the Chuiko Institute of Surface Chemistry of NAS of Ukraine* : conference materials. Kyiv, 2021. P. 213.

*Здобувачем розроблена технологія радіопрозорої кераміки на основі системи  $BaO - SrO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

54. Лісачук Г.В., Пітак Я.М., Сахненко М.Д., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Волощук В.В., Майстат М.С., Сарай В.В., Гребенюк А.П., Кривобок А.В. Керамічні композиційні матеріали для захисту від електромагнітного випромінювання. *Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології* : матеріали І-ї Міжнародної наукової конференції. Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2021. С. 157–158.

*Здобувачем запропонована концепція створення функціональної*

композиційної кераміки.

55. Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Voloshchuk V.V. Effect of Intensifying Additives on the Properties of Celsian Ceramics. *The International research and practice conference “Nanotechnology and nanomaterials” NANO-2022 : conference materials*. Kyiv: LLC APF POLYGRAPH SERVICE, 2022. P. 327.

*Здобувачем встановлений механізм дії інтенсифікаторів спікання.*

56. Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Волощук В.В., Масаликін Р.А., Тимченко О.Р. Вивчення електродинамічних характеристик кераміки на основі алюмосилікатів. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXXI-ї Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023*. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 577.

*Здобувачем вивчені електродинамічні властивості радіопрозорої кераміки на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$ .*

***Здобувач висловлює щире подяку Лауреату Державної премії України в галузі науки і техніки, Заслуженому діячу науки і техніки України, доктору технічних наук, професору ЛІСАЧУКУ Георгію Вікторовичу за цінні поради на окремих етапах теоретичних та практичних досліджень.***

## АНОТАЦІЯ

**Кривобок Р.В. Теоретичні основи технології керамічних матеріалів на основі системи  $RO - Al_2O_3 - SiO_2$  для авіакосмічної техніки. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.11 – технологія тугоплавких неметалічних матеріалів. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2024 р.

Дисертацію присвячено створенню теоретичних основ технології радіопрозорих керамічних матеріалів з низькими значеннями діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат і високими фізико-механічними властивостями на основі алюмосилікатів стронцію, барію та силікату цинку.

Вивчено будову систем  $BaO - SrO - Al_2O_3$ ,  $ZnO - SrO - Al_2O_3$ ,  $SrO - BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  та  $SrO - ZnO - Al_2O_3 - SiO_2$  і теоретично обґрунтовані фізико-хімічні засади одержання радіопрозорих керамічних матеріалів; запропонована концепція одержання функціональних керамічних матеріалів для авіакосмічної техніки, яка полягає у контрольованому синтезі цільових кристалічних фаз заданої структури і розмірів кристалів у раціональному співвідношенні у монофазній та багатофазній кераміці; визначені особливості процесів фазоутворення під час синтезу алюмосилікатів стронцію, барію та силікату цинку.

Проведені дослідження склали теоретичне підґрунтя для розробки технології радіопрозорих керамічних матеріалів на основі системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> з низькими значеннями діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат і високими значеннями фізико-механічних властивостей на основі алюмосилікатів стронцію, барію та силікату цинку за рахунок цілеспрямованого формування фазового складу та структури кераміки.

На основі проведених досліджень будови системи RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> оптимізовані області складів, придатних для отримання керамічних матеріалів, які задовольняють вимоги до радіопрозорі кераміки. Завдяки керованому фазоутворенню радіопрозорі матеріали на основі зазначеної системи відрізняються високими робочими температурами експлуатації та сталістю діелектричних характеристик, що забезпечує надійність роботи радіотехнічного обладнання авіакосмічної техніки при взаємодії із зовнішніми погодними чинниками, механічними і тепловими навантаженнями.

*Ключові слова:* радіопрозорі керамічні матеріали, фазоутворення, структуро-утворення, цельзіан, славсоніт, віллеміт, діелектричні та електродинамічні властивості, механічна міцність, хімічна стійкість, вогнетривкість, технологія, імітаційне моделювання, матеріали для захисних конструкцій.

## ABSTRACT

**Kryvobok R.V. Theoretical bases of ceramic materials technology based on RO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> system for aerospace engineering. – Scientific work on the rights of the manuscript.**

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.17.11 – Technology of refractory non-metallic materials – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2024.

The dissertation is devoted to the creation of theoretical foundations for the technology of radio-transparent ceramic materials with low dielectric constant and dielectric loss tangent and high physical and mechanical properties based on strontium, barium, and zinc aluminosilicates.

BaO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrO – BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> and SrO – ZnO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> systems was studied and the physical and chemical principles of obtaining radiotransparent ceramic materials were theoretically substantiated; the concept of obtaining functional ceramic materials for aerospace engineering, which consists in the controlled synthesis of target crystal phases of a given structure and crystal size in a rational ratio in monophase and multiphase ceramics; the features of phase formation processes during the synthesis of strontium, barium and zinc silicate were determined.

The conducted research formed the theoretical basis for the development of technology of radiotransparent ceramic materials based on the RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> system with low values of dielectric constant and dielectric loss tangent and high values of physical and mechanical properties based on strontium, barium and zinc silicate aluminosilicates due to the targeted formation of the phase composition and structure of ceramics.

Based on the study of the structure of the RO (SrO, BaO, ZnO) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> system, the composition regions suitable for obtaining ceramic materials that meet the requirements for radiotransparent ceramics have been optimized. Due to controlled phase formation, radiotransparent materials based on this system are characterized by high operating temperatures and stable dielectric characteristics, which provides the reliability of aerospace engineering radio equipment when interacting with external weather factors and mechanical and thermal loads.

*Keywords:* radio-transparent ceramic materials, phase formation, structure formation, celsian, slawsonite, willemite, dielectric and electrodynamic properties, mechanical strength, chemical resistance, fire resistance, technology, simulation modeling, materials for protective structures.

