

*Г. В. ЛІСАЧУК, М. А. ТКАЧУК, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ, Д. В. БРЕСЛАВСЬКИЙ, Р. В. КРИВОБОК, В. В. ВОЛОЩУК*

### **РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ГАЗОДИНАМІКИ ТА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВИРОБІВ З ЦЕЛЬЗІАНОВОЇ КЕРАМІКИ**

У роботі з використанням методу скінчених елементів проведено аналіз поведінки носових обтічників, виготовлених із радіопрозорих керамічних матеріалів цельзіанового складу. Визначення параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану проводили за допомогою ліцензійного програмного забезпечення ANSYS. Для точного моделювання повітряного потоку обрано модель турбулентності SSG Reynold Stress. Для розрахунків міцності та температурних полів використовували геометричну та скінченно-елементну моделі. Аналіз результатів газодинамічних розрахунків показує, що в місці переходу конічної частини ракети в циліндричну спостерігається різка зміна умов обтікання та зрив потоку в діапазоні швидкостей 100 – 1100 м/с. В результаті моделювання розподілу температурних полів із зазначеною постановкою завдання встановлено, що температура на внутрішній поверхні обтічника відрізняється від температури на зовнішній поверхні в середньому не більше ніж на  $\pm 1$  °С, а максимальна температура нагріву поверхні не перевищує 550 °С. За результатами розрахунків напружено-деформованого стану за температурних режимів, які імітують умови їх експлуатації, зроблено висновок про те, що в розглянутих умовах еквівалентні ( $\leq 69,3$  МПа) та головні ( $\leq 40$  МПа) напруження, що виникають у носовому обтічнику, не перевищують меж міцності при згині для цельзіанової кераміки (290 МПа). Можна спостерігати, що максимальний температурний перепад за товщиною відповідає частині обтічника з мінімальним радіусом. Переміщення за поверхнею обтічника не перевершують 0,25 мм, що відповідно до заданих параметрів є прийнятним. Параметрична модель надає переваги при обґрунтуванні раціональних технічних рішень. У кінцевому підсумку носовий обтічник, виготовлений з цельзіанової кераміки, зберігатиме свою цілісність в реальних умовах експлуатації.

**Ключові слова:** радіопрозора цельзіанова кераміка; носовий обтічник; метод скінчених елементів; газодинаміка; теплофізичні розрахунки; міцність; напружено-деформований стан

*G. LISACHUK, M.A. TKACHUK, A. VASYLIEV, D. BRESLAVSKY, R. KRYVOBOK, V. VOLOSHCHUK*

### **CALCULATION OF GAS-DYNAMICS PARAMETERS AND STRESS-STRAIN STATE OF CELSIAN CERAMICS PRODUCTS**

In the work using the finite element method, an analysis of the behavior of nose fairings made of radio-transparent ceramic materials of celsian composition was carried out. Determination of parameters of gas dynamics and stress-strain state was carried out using licensed ANSYS software. SSG Reynold Stress turbulence model was chosen for accurate air flow simulation. Geometric and finite element models were used to calculate strength and temperature fields. The analysis of the results of gas-dynamic calculations shows that at the point of transition of the conical part of the rocket into the cylindrical part, there is a sharp change in the flow conditions and a disruption of the flow in the range of speeds of 100-1100 m/s. As a result of modeling the distribution of temperature fields with the stated task, it was established that the temperature on the inner surface of the fairing differs from the temperature on the outer surface by no more than  $\pm 1$  °C on average, and the maximum surface heating temperature does not exceed 550 °C. According to the results of calculations of the stress-strain state under temperature regimes that simulate the conditions of their operation, it was concluded that under the considered conditions the equivalent ( $\leq 69.3$  MPa) and main ( $\leq 40$  MPa) stresses occurring in the nose fairing are not exceed the bending strength limit for celsian ceramics (290 MPa). It can be observed that the maximum temperature difference in thickness corresponds to the part of the fairing with the minimum radius. Movements on the surface of the fairing do not exceed 0.25 mm, which is acceptable according to the specified parameters. The parametric model provides advantages in justifying rational technical solutions. Ultimately, the nose fairing, made of celsian ceramics, will maintain its integrity in real operating conditions.

**Keywords:** radiotransparent celsian ceramics; nose fairing; finite element method; gas dynamics; thermophysical calculations; strength; stress-strain state

**Вступ.** Серед актуальних пріоритетних завдань у матеріалознавстві є створення матеріалів для сучасних галузей науки і техніки з широким діапазоном експлуатаційних властивостей, що відповідають вимогам конкретних споживачів. Підвищені показники термічної стабільності та механічної міцності є найважливішими критеріями при виборі діелектричних матеріалів, що піддаються високим термомеханічним навантаженням [1].

Ефективність сучасних пристроїв у авіаційній та аерокосмічній галузях, їх технічні характеристики та експлуатаційні властивості багато чим зобов'язані встановленим на них радіотехнічним системам. Важливою задачею є захист вказаних систем за допомогою виробів та деталей на основі радіопрозорих керамічних матеріалів.

Їх призначення – захист антенних систем повітряного, наземного та водного базування. Слід зазначити, що з кожним роком зростає попит на збільшення швидкостей польоту авіаційних об'єктів, які в свою чергу висувають більш жорсткі вимоги до матеріалів, на основі яких їх отримують. Отже, при

виготовленні технічних пристроїв найважливішим питанням є вибір необхідного керамічного матеріалу, який захистить електронні прилади від взаємодії з навколишнім середовищем.

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** Універсальним матеріалом для промисловості з точки зору експлуатаційних властивостей є технічна кераміка, яка в залежності від напрямків використання має різноманітний склад та властивості. В залежності від галузі використання розрізняють електротехнічну, радіотехнічну та конструкційну кераміки, а також деякі види спеціального призначення (п'єзо- та феромагнітна, оптично прозора, біокераміка тощо) [2]. Для авіакосмічної промисловості найчастіше використовують радіопрозорі керамічні матеріали. Найбільш перспективним напрямком створення радіопрозорих матеріалів (РПМ) є використання

© Г. В. Лісачук, М. А. Ткачук, А. Ю. Васильєв, Р. В. Кривобок, Д. В. Бреславський, В. В. Волощук, 2023

високотермостійких неорганічних матеріалів: ситали, кварцова та високоглиноземиста кераміка.

У світовій практиці найчастіше для виробництва радіопрозорих антенних обтічників використовують ситали. Отримані деталі експлуатуються лише на швидкостях 4,5–7 М у зв'язку з низькими робочими температурами матеріалу (не більше 900 °С) [3–5]. Втім, головним недоліком радіопрозорих ситалів є складна технологія отримання цільових фаз та велика енерговитратність виробництва, які, в свою чергу, обмежують складність форм готових виробів.

Кварцова кераміка відрізняється стабільністю діелектричних властивостей та високими показниками термостійкості, однак має низьку механічну міцність при згинанні < 50 МПа, а робочі температури не перевищують 1000 °С [6,7].

Розробкою та вдосконаленням технологічних параметрів отримання радіопрозорих матеріалів займаються провідні науковці різних країн [8–16]. У свою чергу, вченими НТУ «ХПІ» розроблено радіопрозорі керамічні матеріали на основі алюмосилікатів, які мають високі показники механічної міцності, низькі показники фізичних та діелектричних властивостей, які відповідають вимогам до радіопрозорих матеріалів [17–20].

Специфіка технології виготовлення обтічників полягає в тому, що метод формоутворення має реалізувати їх конструктивні особливості та специфічні вимоги до функціональних характеристик і умов експлуатації, а також враховувати технологічність матеріалів, з яких виготовляють тонкостінні вироби складної конфігурації [21, 22].

Оскільки вивчення поведінки матеріалів, які використовують для створення елементів авіакосмічної промисловості, у реальних умовах є досить витратним процесом, *метою цієї роботи* є проведення прогнозування поведінки носових обтічників за реальних умов експлуатації з використанням методу скінченних елементів.

**Газодинамічні розрахунки обтічника.** Для розрахунку параметрів газодинаміки та напружено-деформованого стану обтічників як вихідні данні були обрані розміри та геометрія обтічника оперативно-тактичної ракети певного ракетного комплексу. Для розрахунків газодинаміки носового обтічника ракету моделювали як тіло обертання, з діаметром циліндричної частини 57 мм. Загальна довжина ракети взята з виставкових макетів – 1150 мм. Підкрилки та керуючі керма не моделювали через відсутність достовірної інформації щодо їх геометрії.

Розрахунковою областю є прямокутний паралелепіпед довжиною 10 м та відступами від ракети на 2,5 м. З урахуванням того, що у всіх випадках потік буде мати мінімум одну площину симетрії, моделюється половина обтічника. Ракета розміщена в центрі паралелепіпеда. Кут відхилення ракети від основного потоку задається в межах 0–15° з кроком в 5°. При відхиленні в 0° ракета

орієнтована уздовж осі OZ.

Для моделювання процесу обтікання потоками повітря використаний пакет ANSYS CFX. Для розрахунку була побудована сітка з тетраедральними та призматичними елементами загальним обсягом 121,2 тис. комірок, кінцевий вигляд розрахункової сітки наведено на рис. 1. Для більш високої точності розрахунку в області розташування обтічника ракети здійснено згущення сітки та 5 пристінкових шарів. При цьому в місці «вістря» обтічника розмір сітки був встановлений у 0,2 мм.

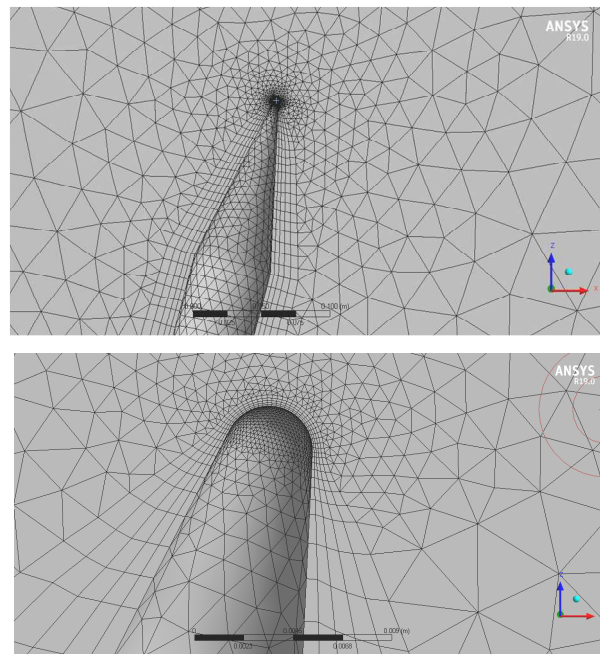


Рисунок 1 – Загальний вигляд розрахункової сітки та «вістря» обтічника

Прийняті наступні граничні умови: на вході – швидкість потоку вздовж осі OZ в інтервалі від 100 до 1100 м/с; на виході (тобто на всіх гранях, крім граней ракети, і межі з симетрією) – вільний рух повітря. При швидкостях 100–200 м/с потік вважається дозвуковим. При швидкостях 200–400 м/с – змішаним або близькозвуковим перехідним. При швидкостях понад 400 м/с потік повітря вважається надзвуковим.

Повітря моделюється як ідеальний газ, який стискається у зв'язку з наявністю високого тиску, який призводить до нагрівання, тому при розрахунках був включений режим теплообміну з урахуванням стиснення на основі рівнянь збереження повної енергії з урахуванням роботи в'язких сил. Температура повітря задана як -50 °С (для висоти 10 000 м над рівнем моря). Для більш точного моделювання повітряного потоку обрана модель турбулентності SSG Reynold Stress.

Аналіз результатів показує, що в районі переходу конічної частини в циліндричну спостерігається різка зміна умов обтікання і зрив потоку практично на всьому діапазоні швидкостей. При кутах більше 0° на конічній частині, крім зон

стиснення з підвищеним тиском, спостерігаються також зони розрідження. Довжина ракети та наявність хвостового оперення практично не впливають на характер обтікання наконечника для діапазону кутів  $0 - 15^\circ$ . У той же час наявність і геометрія передніх стабілізаторів, а отже, їх орієнтація щодо потоку може істотно вплинути на характер обтікання, а значить і на розподіл полів тисків і температури.

Згідно з різними відкритими джерелами

Таблиця 1 – Результати розрахунків для побудови моделі обтічника

Швидкість польоту, м/с	$P_{\min}$ , КПа		$P_{\max}$ , КПа		$V_{\max}$ , м/с		$T_{\min}$ , °C		$T_{\max}$ , °C	
	0	15	0	15	0	15	0	15	0	15
1100	-100,7	-100,8	1482,0	1651,0	1119,0	875,9	484,6	487,1	552,0	551,9
1000	-100,5	-100,4	1199,0	1370,0	1019,0	778,9	391,8	393,5	448,6	447,7
800	-98,8	-98,4	889,5	889,5	854,9	581,8	233,1	232,9	268,6	268,4
600	-91,7	-93,4	424,4	447,0	629,7	377,4	109,3	108,1	129,1	129,2
400	-70,8	-77,6	185,5	183,3	493,9	220,8	20,4	17,7	29,7	29,6
300	-45,7	-60,7	92,4	91,4	354,2	155,0	-11,6	-14,3	-5,3	-5,3
200	-20,3	-28,7	36,1	35,8	231,2	-0,8	-33,3	-33,8	-30,2	-30,2
100	-5,5	-6,8	8,3	8,3	111,9	-144,2	-45,8	-45,9	-44,1	-45,1

Від'ємна швидкість пов'язана з тим що на невеликих швидкостях утворюються області з завихренням і протитечією. На основі отриманих даних будуються аналізи дії температури та механічних навантажень.

**Теплофізичні розрахунки.** При розрахунку температурних полів для обтічника ракети він моделюється, як і ракета, як тіло обертання. Для моделювання розподілу полів температур використаний програмний пакет ANSYS Mechanical. Для розрахунку побудована сітка зі скінченними елементами переважно гексаедричної та призматичної форм. Загальний вигляд розрахункової сітки наведено на рис. 2. Для підвищення точності розрахунку в тонкостінних частинах створювалися два шари елементів другого порядку. Кількість вузлів та елементів – відповідно, 26 тис. та 6,5 тис. Для розрахунку використовували дані щодо властивостей розробленої цельзіанової кераміки (табл. 2) [24].

Таблиця 2 – Дані для проведення теплофізичних розрахунків

Властивості	Цельзіанова кераміка
Модуль пружності, ГПа	~ 70
Коефіцієнт Пуассона	~ 0,3
Густина, кг/м <sup>3</sup>	2630
Межа міцності при стиску, МПа	~ 450
Межа міцності при згині, МПа	290
Коефіцієнт теплового розширення, 1/°C	$2,7 \cdot 10^{-6}$

Для моделювання розподілу температур від параметрів газодинаміки (температури, швидкості та

інформації [23] кут атаки у ракет може змінюватися найчастіше в діапазоні  $-25^\circ - +25^\circ$ . Для симетричних ракет це перетворюється в  $0-25^\circ$ . У той же час слід зазначити, що на великих швидкостях кути атаки більше  $8-10^\circ$  можуть призводити до руйнування ракети. Таким чином, для розрахунку обраний діапазон кутів атаки  $0-15^\circ$ .

Результати розрахунків для екстремальних значень кутів відхилення ( $0^\circ$  та  $15^\circ$ ) узагальнені в табл. 1.

тиску повітряного потоку), як граничні умови прийняті наступні:

- значення температур на зовнішній поверхні обтічника, визначені за розрахунками газодинаміки обтікання ракети;
- умови симетрії;
- умови конвективного теплообміну з повітрям всередині ракети.

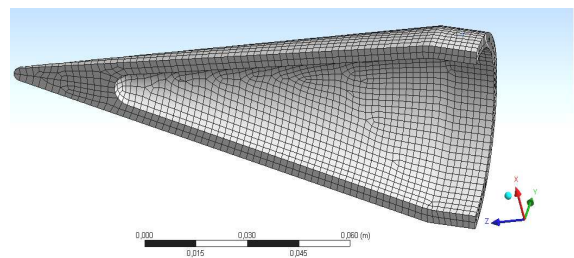


Рисунок 2 – Профіль ескізу обтічника ракети в програмному забезпеченні ANSYS Mechanical

Також зроблено припущення, що повітря всередині ракети має температуру, схожу з температурою навколишнього повітря на висоті пуску (у цьому випадку  $-50^\circ\text{C}$ ). У такому випадку використана статична постановка. При розрахунку процесу нагрівання використана динамічна постановка дає можливість розраховувати перехідні процеси. При цьому промодельовані 4 випадки, які відрізняються швидкістю та типом нагріву. Дані наведені в табл. 3.

Для розрахунків 1 та 2 режимів нагрів вважається постійним по всьому об'єму і відбувається він із зазначеною швидкістю (рис. 3), а

для розрахунків 3-го та 4-го режимів – що відбувається нагрів тільки зовнішнього середовища, при цьому нагрівається воно із вказаною швидкістю (рис. 4). Таким чином, параметри внутрішньої конвекції не змінюються, а параметри конвекції по зовнішній поверхні відбуваються з дедалі більшою температурою.

У результаті моделювання розподілу температурних полів із зазначеною постановкою завдання встановлено, що температура на внутрішній поверхні обтічника відрізняється від температури на зовнішній поверхні в середньому не більше ніж на  $1^{\circ}\text{C}$ . З огляду на це, наведені результати, отримані при моделюванні процесу обтікання ракети в умовах польоту (рис. 5).

Результати температур, отримані з розрахунку газодинаміки наведені в табл. 4. Слід пам'ятати, що температура повітря навколо ракети була прийнята

$-50^{\circ}\text{C}$ , що відповідає польоту на висоті в 10 км.

Результати температур, отримані з розрахунку газодинаміки наведені в табл. 4. Слід пам'ятати, що температура повітря навколо ракети була прийнята  $-50^{\circ}\text{C}$ , що відповідає польоту на висоті в 10 км.

Таблиця 3 – Температурні режими нагріву обтічника

Порядковий номер режиму	Швидкість нагріву, град/с	Тип нагріву
1	100	Об'єм
2	15	Об'єм
3	100	Зовнішня поверхня
4	15	Зовнішня поверхня

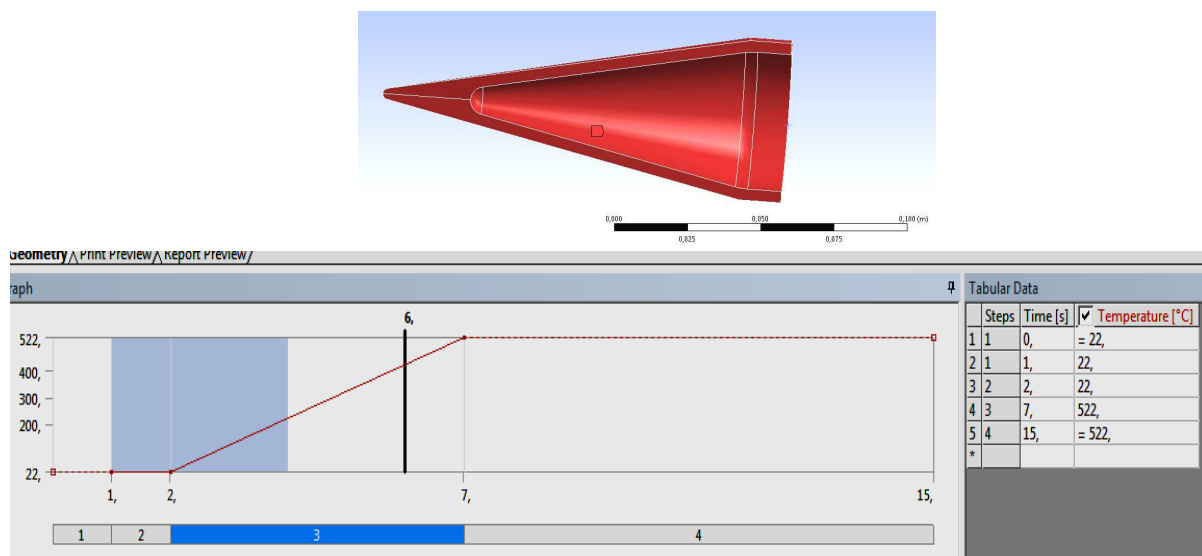


Рисунок 3 – Розрахунок при температурних режимах 1 та 2

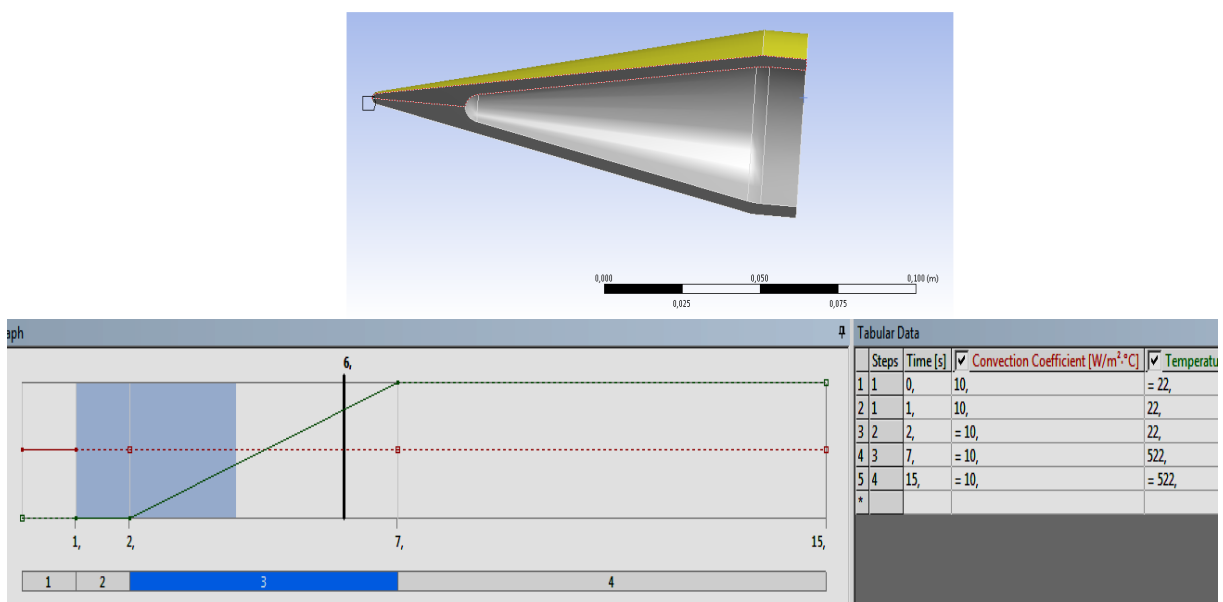


Рисунок 4 – Розрахунок при температурних режимах 3 та 4

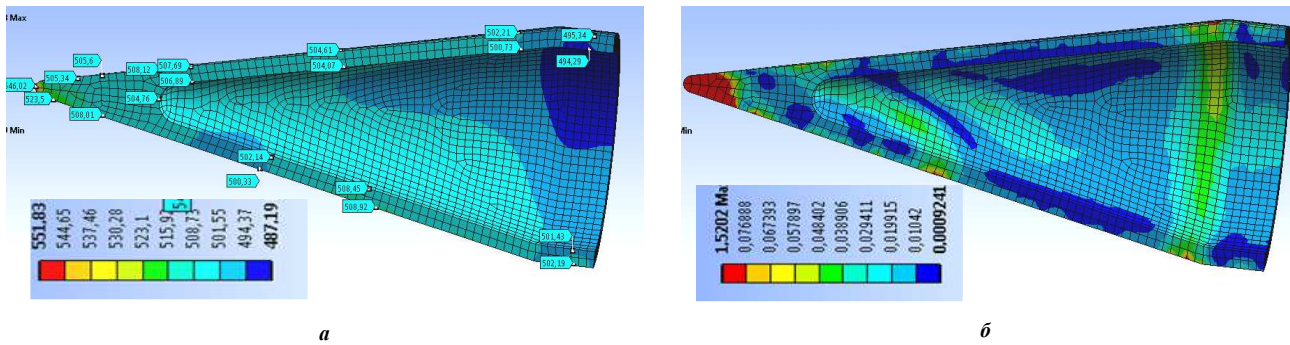


Рисунок 5 – Приклад порівняння розподілу температур:

*a* – на зовнішній і внутрішній поверхні наконечника; *б* – на зовнішній поверхні наконечника при тепловому потоці

Таблиця 4 – Результати розрахунку газодинаміки обтічника

Швидкість польоту, м/с	$T_{min}, ^\circ C$		$T_{max}, ^\circ C$	
	0	15	0	15
1100	484,6	487,1	552,0	551,9
1000	391,8	393,5	448,6	447,7
800	233,1	232,9	268,6	268,4
600	109,3	108,1	129,1	129,2
400	20,4	17,7	29,7	29,6
300	-11,6	-14,3	-5,3	-5,3
200	-33,3	-33,8	-30,2	-30,2
100	-45,8	-45,9	-44,1	-45,1

Таблиця 5 – Результати розрахунку міцності носового обтічника

№ п/п	Деформування, мм	Напруження, МПа				
		Еквівалентні	Головні найбільші		Головні найменші	
			max	min	max	min
1	0,176	34,03	32,2	-5	-33,17	1,76
2	0,168	2,52	1,51	-1,32	-2,22	0,018
3	0,006	4,32	3,41	-0,84	-5,39	0,11
4	0,246	25,9	26,33	-8,85	-23,17	9,7
5	0,001	2,92	3,05	-0,03	-1,97	0,27
6	0,0004	0,76	0,18	-0,013	-0,78	0
7	0,003	53,14	39,32	-2,79	-25,34	0,29
8	-3,80E-05	0,008	0,008	0	-0,008	0
9	0,006	19,08	11,16	-0,34	-21,59	3,47
10	0,01	31,61	13,75	-5,5	-34,29	1,27
11	0,16	3,9	-	-	-	-
12	0,178	4,29	-	-	-	-
13	0,18	4,29	-	-	-	-
14	0,14	3,54	-	-	-	-

**Аналіз характеристик міцності.** При розрахунку міцності використана геометрична та скінченно-елементна моделі, аналогічні тим, що використовувалися при розрахунку температурних полів (теплофізичні розрахунки). Єдина відмінність полягає у граничних умовах. При розрахунку міцності, крім силових факторів або отриманих даних з газодинамічного розрахунку (поле розподілу

тисків), додатково використовуються поля температур, отримані в ході теплофізичних розрахунків. Результати розрахунків наведені у табл. 5. Найбільше навантаження властиве варіантам 1, 7 та 10. Розподіл еквівалентних напружень для перелічених варіантів наведено на рис. 6.

**Визначення напружено-деформованого стану в керамічному обтічнику.** Аналіз напружено-



деформованого стану виконується для оцінювання міцності носового обтічника. Оскільки він працює в неоднорідному тепловому полі, для розв'язання задачі термопружності спочатку є необхідним аналіз задачі теплопровідності. У першому наближенні її розв'язано як задачу стаціонарної теплопровідності, тобто вважалось, що завдяки завершенню процесу нагрівання температурне поле є постійним та незмінним у часі з максимальними значеннями температур.

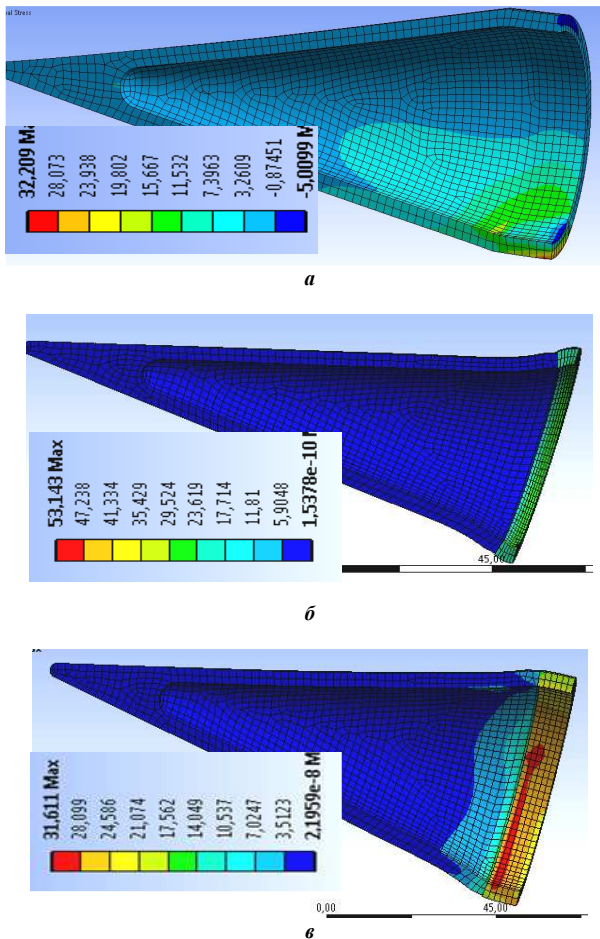


Рисунок 6 – Візуалізація розподілу напружень в обтічнику відповідно для варіантів: а – 1, б – 7, в – 10

До розрахунків залучено наступні константи матеріалу: питома теплоємність 0,703 КДж/(Кг К), коефіцієнт теплопровідності 2 Вт/(м К). Значення визначено за довідковими даними для керамічних матеріалів.

Результати розрахунку поставленої задачі наведено на рис. 7. Можна спостерігати, що максимальний температурний перепад за товщиною відповідає частині обтічника з мінімальним радіусом.

Отриманий температурний розподіл використано для розв'язання задачі термопружності. У розрахунках використано наступні фізичні властивості: модуль пружності  $7 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>, коефіцієнт Пуассона 0,3 (середні значення для кераміки), коефіцієнт лінійного (теплого) розширення  $2,7 \cdot 10^{-6}$  1/К (цельзіан).

Окрім неоднорідного температурного розподілу, на оболонку діє зовнішній тиск. У розрахунках прийнято його рівномірний розподіл із максимальним значенням 0,86 МПа. Результати розрахунків наведено на рис. 8 (повні переміщення) та рис. 9 (еквівалентні напруження).

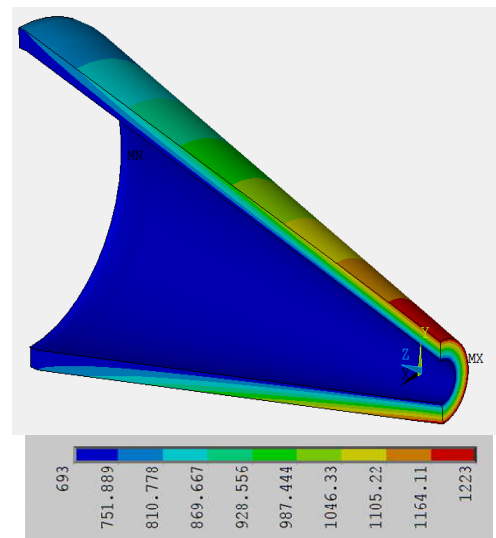


Рисунок 7 – Розподіл температури за об'ємом обтічника, градуси К

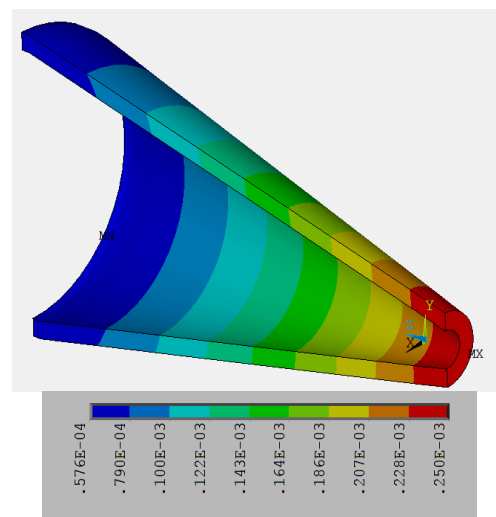


Рисунок 8 – Розподіл сумарних значень переміщень за обтічником, м

Як видно з рис. 8, у розглянутій постановці задачі максимальні переміщення не перевершують 0,25 мм, що відповідно до заданих параметрів обтічника є прийнятним.

Максимальні еквівалентні напруження (рис. 9), які діють на поверхню носового обтічника, не перевищують 69,3 МПа, що є меншим, ніж значення межі міцності при згині для розглянутої цельзіанової кераміки (290 МПа). Тобто можна зробити висновок, що миттєвого руйнування обтічника не відбудеться, а запас міцності є більшим, ніж у 3 рази.

**Висновки.** За результатами проведених газодинамічних та теплофізичних розрахунків розроблена модель напружено-деформованого стану носових обтічників авіаційних об'єктів.

Моделювання НДС здійснено із залученням методу скінченних елементів. У модель НДС носового обтічника закладено його узагальнені параметри, які містять необхідні варійовані проектно-технологічні чинники. Аналіз розроблених моделей та встановлених за їх допомогою закономірностей дає можливість зробити наступні висновки.

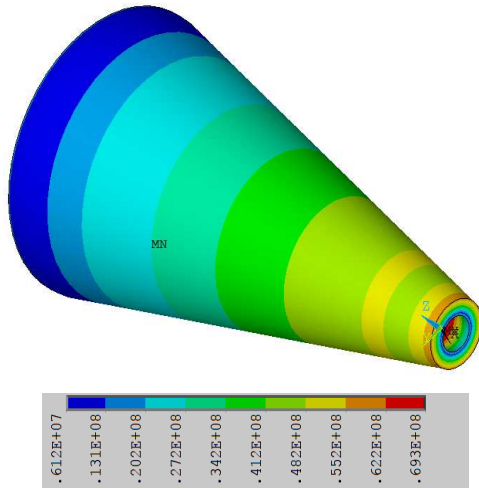


Рисунок 9 – Розподіл еквівалентних напружень за поверхню обтічника, Па

1. За результатами проведених газодинамічних розрахунків визначено, що в розглянутому діапазоні швидкостей польоту ракети (100 – 1100 м/с) у місці переходу конічної частини в циліндричну спостерігається різка зміна умов обтікання та зрив потоку.

2. Аналіз результатів моделювання розподілу температурних полів носового обтічника за визначених умов експлуатації засвідчив, що максимальна температура нагріву поверхні досягається при швидкості польоту ракети 1100 м/с та досягає позначки 552 °С, а температура між зовнішньою та внутрішньою поверхнями обтічника відрізняється не більше ніж на  $\pm 1$  °С.

3. За результатами розрахунків напружено-деформованого стану за температурних режимів, які імітують умови їх експлуатації, зроблено висновок про те, що в розглянутих умовах еквівалентні ( $\leq 69,3$  МПа) та головні ( $\leq 40$  МПа) напруження, що виникають у носовому обтічнику, не перевищують меж міцності при згині для цельзіанової кераміки та мають запас міцності більш ніж в 3 рази. При зазначених навантаженнях максимальні переміщення за поверхню обтічника не перевершують 0,25 мм, що відповідно до заданих параметрів є прийнятним.

Враховуючи вищенаведене, можна зробити висновок, що миттєвого руйнування обтічника, виготовленого з цельзіанової кераміки, не відбудеться, отже, він зберігатиме свою цілісність у реальних умовах експлуатації. У зв'язку з подібністю структури та схожістю властивостей кристалічних фаз цельзіану та славсоніту можна прогнозувати аналогічну поведінку славсонітової кераміки в реальних умовах експлуатації обтічників,

що і слугуватиме подальшим напрямком досліджень.

### Список літератури

1. Sebastian, M. T., Ubic, R., Jantunen, H. (2015). Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *International Materials Reviews*, 60 (7), 392–412. doi: <https://doi.org/10.1179/1743280415y.0000000007>
2. Саввова О. В. Хімічні технології архітектурно-будівельної та технічної кераміки : конспект лекцій для студентів 1 курсу денної форми навчання другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 161 – Хімічні технології та інженерія / О. В. Саввова, Г. К. Воронов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2020. 97 с.
3. Suzdal'tsev E.I., Rozhkova T.I. Materials with Controlled Dielectric Constants Based on a Glass Ceramic of Lithium Alumina-silicate Composition. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003. Vol. 44, №4. P. 260–262.
4. A. Zaychuk, Ts. Dimitrov, A. Amelina, D. Vedmead. Low-temperature glass-ceramics based on Spodumene. *Proceedings of University of Ruse*. 2017. Vol. 56, № 10.1. P. 47–50.
5. O. Zaichuk, A. Amelina, Yu. Hordieiev, Y. Kalishenko, N. Sribniak, S. Halushka, D. Borodai, A. Borodai. Patterns in the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 6, № 6 (108). P. 15 – 26. doi: 10.15587/1729-4061.2020.216754.
6. Holland W., Beall G. Glass Ceramic Technology. *Journal of the American Ceramic Society*. 2002. P.372. DOI:10.2298/SOS0403216U.
7. Ромашин А.Г., Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания: Учеб. пособие. Харьков: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2003.
8. Bolelli G., Cannillo V., Lusvardi L., Manfredini T., Siligardi C., Bartoli C., Loreto A., Valente T. Plasma-sprayed glass-ceramic coatings on ceramic tiles: microstructure, chemical resistance and mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. № 25. P. 1835–1853.
9. Savchuk GK, Petrochenko TP, Klimza AA. Preparation and dielectric properties of celsian ceramics based on hexagonal BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>. *Inorg Mater*. 2013. 49: 632-637. doi: 10.1134/S0020168513060101.
10. Fu YP, Chang CC, Lin CH, Chin TS. Solid-state synthesis of ceramics in the ÅO–SrO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> system. *Ceram Int*. 2004; 30: 41-45. doi: 10.1016/S0272-8842(03)00059-2.
11. Berdnik, S., Dumin, O., Katrich, V., Nesterenko, M., Pshenichnaya, S., & Shulga, S. (2022). Determination of the effective permittivity of quartz nanocomposites with fullerene inclusions. Paper presented at the 2022 *IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2022 - Proceedings*, 658-661. doi:10.1109/ELNANO54667.2022.9927069.
12. Саркисов П.Д., Гращенков Д.В., Орлова Л.А. Современные достижения в области создания высокотемпературных радиопрозрачных материалов. *Техника и технология силикатов*. 2009. № 1. С. 2 – 10.
13. Krzmann M.M., Jančar B., Suvorov D. The influence of

- tetrahedral ordering on the microwave dielectric properties of  $\text{Sr}_{0.05}\text{Ba}_{0.95}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  and (M = Al, Ga, M = Si, Ge) ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. № 28. P. 3141–3148. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.024
15. Bocharov, A. N., Pahomov, E. P., Petrovskiy, V. P., Politiko, A. A., Semenenko, V. N., & Chistyayev, V. A. (2020). Optimization of the radiotransparent constructions in a mode of extreme heat loads. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series, 1556*(1) doi:10.1088/1742-6596/1556/1/012016.
  16. Agrafiotis C., Tsoutsos T. D. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Applied Thermal Engineering*. 2001. № 21 (12). P. 1231–1249.
  17. Egorov S.V., Bykov Y.V., Ereemeev A.G., Sorokin A.A., Serov E.A., Parshin V.V., Balabanov S.S., Belyaev A.V., Novikova V.A., Permin D. A. (2017). Millimeter-wavelength radiation used to sinter radiotransparent  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  ceramics. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 59(8-9), 690–697. doi:10.1007/s11141-017-9736-8.
  18. 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 ceramics. *Építőanyag – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2022. Vol. 74, № 6. P. 224–228. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2022.32>
  19. Рищенко М.І., Федоренко О.Ю., Лісюткіна М.Ю., Шевцов О.В., Білогубкіна К.В., Регада Н.М. Закономірності фазотворення, структура та властивості хімічно і термічно стійких керамічних матеріалів. *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки*. 2018. № 118. С. 119–131. DOI: <https://doi.org/10.35857/2663-3566.118.11>.
  20. Podbolotov K.B., Volochko A.T., Lisachuk G.V., Krivobok R.V., Voloshchuk V.V. Exothermic synthesis of ceramic materials based on barium and strontium aluminosilicates. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. № 6. P. 57–64. URL: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-139-6-57-64>.
  21. Lisachuk G.V., Krivobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov E.V., Prytkina M.S., Fedorenko E.Y., Dajneko K.B., Annabaev A., Kisała P., Mussabekov K., Romaniuk R. Optimization of the compositions area of radiotransparent ceramic in the  $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  system. *Przegląd elektrotechniczny*. 2017. № 3. P. 79–82. DOI:10.15199/48.2017.03.19
  22. Zaichuk A.V., Amelina A.A., Karasik Y.V. et al (2019). Radiotransparent ceramic materials of spodumene-cordierite composition. *Functional materials*. № 26 (1). pp. 174–181, doi: 10.20998/2220-4784.2021.02.03.
  23. К. В. Білогубкіна, О. Ю. Федоренко, Р. В. Кривобок, А. В. Захаров. Розробка технологічних параметрів формування обтічників методом шлікерного лиття. *Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів, 2021, № 2 (1362). P. 15-21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2021.02.03>.
  24. Lawford J.A., Nippres, K.R. Calibration of Air-data Systems and Flow Direction Sensors (NATO). *Advisory Group for Aerospace Research and Development: AGARDograph / Edited by R.W. Bcrek*, 1984. № 300, Vol. 1, p. 40–48.
  25. Lisachuk, G., Kryvobok, R., Voloshchuk, V., Lapuzina, O., & Zakharov, A. (2021). Study of technological features of celsian ceramics creation. Paper presented at the *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties"*, NAP 2021, doi:10.1109/NAP51885.2021.9568546.

#### References (transliterated)

1. Sebastian, M. T., Ubic, R., Jantunen, H. (2015). Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *International Materials Reviews*, 60 (7), 392–412. doi: <https://doi.org/10.1179/1743280415y.0000000007>
2. Savvova O. V. Khimichni tekhnolohiyi arkhitekturno-budivelnoyi ta tekhnichnoyi keramiky : konspekt lektsiy dlya studentiv 1 kursu dennoyi formy navchannya druhoho (mahisters'koho) rivnya vyshchoyi osvity za spetsial'nistyuu 161 – Khimichni tekhnolohiyi ta inzheneriya / O. V. Savvova, H. K. Voronov ; Kharkiv. nats. un-t mis'k. hosp-va im. O. M. Beketova. Kharkiv : KHNUMH im. O.M. Beketova, 2020. 97 s.
3. Suzdal'tsev E.I., Rozhkova T.I. Materials with Controlled Dielectric Constants Based on a Glass Ceramic of Lithium Alumina-silicate Composition. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2003. Vol. 44, №4. P. 260–262.
4. A. Zaychuk, Ts. Dimitrov, A. Amelina, D. Vedmead. Low-temperature glass-ceramics based on Spodumene. *Proceedings of University of Ruse*. 2017. Vol. 56, № 10.1. P. 47–50.
5. O. Zaichuk, A. Amelina, Yu. Hordieiev, Y. Kalishenko, N. Sribniak, S. Halushka, D. Borodai, A. Borodai. Patterns in the synthesis processes, the microstructure and properties of strontium anorthite ceramics modified by glass of spodumene composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol 6, № 6 (108). P. 15 – 26. doi: 10.15587/1729-4061.2020.216754.
6. Holland W., Beall G. Glass Ceramic Technology. *Journal of the American Ceramic Society*. 2002. P.372. DOI:10.2298/SOS0403216U.
7. Romashin A.G., Gaydachuk V.Ye., Karpov YA.S., Rusin M.YU. Radioprozrachnyye obtekateli letatel'nykh apparatov. *Proyektirovaniye, konstruksionnyye materialy, tekhnologiya proizvodstva, ispytaniya: Ucheb. posobiye*. Khar'kov: Natsional'nyy aerokosmicheskii universitet «KHAi», 2003.
8. Bolelli G., Cannillo V., Lusvarghi L., Manfredini T., Siligardi C., Bartuli C., Loreto A., Valente T. Plasma-sprayed glass-ceramic coatings on ceramic tiles: microstructure, chemical resistance and mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. № 25. P. 1835–1853.
9. Savchuk GK, Petrochenko TP, Klimza AA. Preparation and dielectric properties of celsian ceramics based on hexagonal  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ . *Inorg Mater*. 2013. 49: 632-637. doi: 10.1134/S0020168513060101.
10. Fu YP, Chang CC, Lin CH, Chin TS. Solid-state synthesis of ceramics in the  $\text{ÀÀO-SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  system. *Ceram Int*. 2004; 30: 41-45. doi: 10.1016/S0272-8842(03)00059-2.
11. Berdnik, S., Dumin, O., Katrich, V., Nesterenko, M., Pshenichnaya, S., & Shulga, S. (2022). Determination of the effective permittivity of quartz nanocomposites with fullerene inclusions. Paper presented at the *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2022 - Proceedings*, 658-661. doi:10.1109/ELNANO54667.2022.9927069.
12. Sarkisov P.D., Grashchenkov D.V., Orlova L.A. Sovremennyye dostizheniya v oblasti sozdaniya vysokotemperaturnykh radioprozrachnykh materialov. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov*. 2009. № 1. P. 2 – 10.
13. Krzmann M.M., Jančar B., Suvorov D. The influence of



- tetrahedral ordering on the microwave dielectric properties of  $\text{Sr}_{0.05}\text{Ba}_{0.95}\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  and (M = Al, Ga, M = Si, Ge) ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008. № 28. P. 3141–3148. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.024
14. Bocharov, A. N., Pahomov, E. P., Petrovskiy, V. P., Politko, A. A., Semenenko, V. N., & Chistyayev, V. A. (2020). Optimization of the radiotransparent constructions in a mode of extreme heat loads. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series, 1556*(1) doi:10.1088/1742-6596/1556/1/012016.
  15. Agrafiotis C., Tsoutsos T. D. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. *Applied Thermal Engineering*. 2001. № 21 (12). P. 1231–1249.
  16. Egorov S.V., Bykov Y.V., Ereemeev A.G., Sorokin A.A., Serov E.A., Parshin V.V., Balabanov S.S., Belyaev A.V., Novikova V.A., Permin D. A. (2017). Millimeter-wavelength radiation used to sinter radiotransparent  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  ceramics. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 59(8-9), 690–697. doi:10.1007/s11141-017-9736-8.
  17. 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 ceramics. *Éпітoáныяг – Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 2022. Vol. 74, № 6. P. 224–228. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2022.32>
  18. Ryshchenko M.I., Fedorenko O.YU., Lisyutkina M.YU., Shevtsov O.V., Bilohubkina K.V., Reheda N.M. Zakonomirnosti fazoutvorennia, struktura ta vlastyvoli khimichno i termichno stykykh keramichnykh materialiv. Naukovi doslidzhennia z vohnetryviv ta tekhnichnoyi keramiky. 2018. № 118. P. 119–131. DOI: <https://doi.org/10.35857/2663-3566.118.11>.
  19. Podbolotov K.B., Volochko A.T., Lisachuk G.V., Krivobok R.V., Voloshchuk V.V. Exothermic synthesis of ceramic materials based on barium and strontium aluminosilicates. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2021. № 6. P. 57–64. URL: <http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2021-139-6-57-64>.
  20. Lisachuk G.V., Krivobok R.V., Zakharov A.V., Chefranov E.V., Prytkina M.S., Fedorenko E.Y., Dajneko K.B., Annabaev A., Kisała P., Mussabekov K., Romaniuk R. Optimization of the compositions area of radiotransparent ceramic in the  $\text{SrO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  system. *Przeegląd elektrotechniczny*. 2017. № 3. P. 79–82. DOI:10.15199/48.2017.03.19
  21. Zaichuk A.V., Amelina A.A., Karasik Y.V. et al (2019). Radiotransparent ceramic materials of spodumene-cordierite composition. *Functional materials*. № 26 (1). pp. 174–181, doi: 10.20998/2220-4784.2021.02.03.
  22. K.V. Bilohubkina, O.YU. Fedorenko, R.V. Kryvobok, A.V. Zakharov. Rozrobka tekhnolohichnykh parametriv formuvannia obtichnykh metodom shlikernoho lyttia. Visnyk Natsional'noho Tekhnichnoho Universytetu «KHPI». Seriya: Innovatsiyni doslidzhennia u naukovykh robotakh studentiv, 2021, № 2 (1362). P. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.20998/2220-4784.2021.02.03>.
  23. Lawford J.A., Nippress, K.R. Calibration of Air-data Systems and Flow Direction Sensors (NATO). *Advisory Group for Aerospace Research and Development: AGARDograph / Edited by R.W. Bcrek*, 1984. № 300, vol. 1, p. 40–48.
  24. Lisachuk, G., Kryvobok, R., Voloshchuk, V., Lapuzina, O., & Zakharov, A. (2021). Study of technological features of celsian ceramics creation. Paper presented at the *Proceedings of the 2021 IEEE 11th International Conference "Nanomaterials: Applications and Properties"*, NAP 2021, doi:10.1109/NAP51885.2021.9568546.

Надійшла (received) 22.03.2023

#### Відомості про авторів / About the Authors

**Лісачук Георгій Вікторович / Lisachuk Georgiy** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач науково-дослідної частини; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7157-9115>; e-mail: [lisachuk@kpi.kharkov.ua](mailto:lisachuk@kpi.kharkov.ua).

**Ткачук Микола Анатолійович / Tkachuk Mykola A.** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: [tma@tmm-sapr.org](mailto:tma@tmm-sapr.org).

**Васильєв Антон Юрійович / Vasyliiev Anton** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-0950>; тел.: (057)7076166, e-mail: [AVasyliiev@tmm-sapr.org](mailto:AVasyliiev@tmm-sapr.org).

**Бреславський Дмитро Васильович / Breslavsky Dmytro** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри комп'ютерного моделювання процесів та систем, м. Харків, Україна; e-mail: [Dmytro.Breslavsky@khi.kharkiv.edu](mailto:Dmytro.Breslavsky@khi.kharkiv.edu); Магдебурзький університет ім. Отто фон Гьоріке, e-mail: [Dmytro.Breslavsky@ovgu.de](mailto:Dmytro.Breslavsky@ovgu.de).

**Кривобок Руслан Вікторович / Kryvobok Ruslan** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», заступник завідувача науково-дослідної частини, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2334-4434>; e-mail: [krivobok491@gmail.com](mailto:krivobok491@gmail.com).

**Волощук Валентина Василівна / Voloshchuk Valentyna** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», молодший науковий співробітник відділу науково-технічної інформації та патентно-ліцензійної роботи, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2120-3088>; e-mail: [valenty93vol@gmail.com](mailto:valenty93vol@gmail.com).