

УДК 535.015

## ВПЛИВ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НА ПАРАКСІАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБТІКАЧА ГОЛОВКИ САМОНАВЕДЕННЯ

Кузьменко Б. М., Ткаченко О. А., Чиж І. Г.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,  
м. Київ, Україна

У статті викладається методика оцінки впливу нестационарного температурного поля сферичного обтікача на його параксіальні характеристики. Показано як під впливом нерівномірного нагріву обтікача змінюються його конструктивні параметри, та виникає градієнтний розподіл показника заломлення. Встановлене температурне поле за допомогою лінійного наближення було перетворене у двовимірну функцію показника заломлення. Коефіцієнти апроксимації функції показника заломлення знайдені із її апроксимації методом регресії з використанням для цього методу найменших квадратів.

При розрахунку деформації оптичної поверхні у конкретний момент часу була використана програма ELCUT, а при розрахунку параксіальних характеристик деформованого меніска з градієнтом показника заломлення – програма ZEMAX. Наведені результати аналізу температурних змін фокусної відстані та заднього фокального відрізка менісків виготовлених із оптичної кераміки та сапфіру.

**Ключові слова:** Нестационарне температурне поле, сферичний обтікач, градієнт показника заломлення, профіль показника заломлення, асферична поверхня.

### Вступ

У процесі польоту ракети із надзвуковою швидкістю в щільних шарах атмосфери, обтікач головки самонаведення, що встановлений в носовій частині, піддається нерівномірно інтенсивному аеродинамічному нагріву. Під впливом температурного поля показник заломлення змінюється нерівномірно по всьому об'єму, робочі оптичні поверхні перестають бути сферичними, змінюється товщина оптичного елемента. Ці зміни конструктивних параметрів можуть викликати додаткові похибки у роботі оптичної системи головки самонаведення.

За цим напрямком досліджень не опубліковано жодних експериментальних результатів, а в теоретичній роботі [1] розглядається лише вплив аеродинамічного нагріву на обтікач іншої конфігурації для радіолокаційних систем самонаведення.

На етапі проектування для врахування та подальшої компенсації теплових спотворень необхідно визначити вплив нестационарного температурного поля на параксіальні характеристики обтікача головки самонаведення.

### Постановка задачі

У пасивних головках самонаведення обтікач виконано в формі меніска з концентричними поверхнями [2].

Градієнт показника заломлення виникає в результаті нерівномірного нагріву оптичного елемента і в радіальному, і в осьовому напрямку. У кожній точці об'єму його можна визначити за формулою [3], що має вигляд

$$n_i = n_0 + \beta_{abs} \Delta T(h, z), \quad (1)$$

де  $n_0$  – відносний показник заломлення матеріалу обтікача за нормальних умов;  $\beta_{abs}$  – температурний коефіцієнт показника заломлення;  $\Delta T(h, z)$  – різниця між температурою у кожній точці та температурою нормальних умов.

Температурний коефіцієнт показника заломлення  $\beta_{abs}$  залежить від діапазону температур та від довжини хвилі. Тому для правильного розрахунку необхідно враховувати ці обидва чинники.

Внаслідок нерівномірного нагріву кожна точка поверхні меніска зміщується по висоті (перпендикулярно оптичній осі) і по товщині (паралельно оптичній осі). Ці зміщені точки утворюють нову деформовану поверхню.

У зв'язку з цим постає задача визначення впливу градієнтного розподілу показника заломлення та деформації оптичних поверхонь обтікача на його параксіальні характеристики.

### Метод вирішення задачі

Вирішення задачі здійснено двома етапами.

Перший етап – знаходження розподілу показника заломлення в тілі меніска, другий – знаходження форми деформованих зовнішніх оптичних поверхонь. Кожен із етапів завершується розрахунками фокусної відстані обтікача. Виявлені зміни величини фокусної області вказують на вплив чиннику, що досліджується, на вказаний головний параксіальний параметр обтікача.

Для знаходження градієнтного розподілу показника заломлення потрібно визначити показник заломлення матеріалу в кожній точці, який виникає через нерівномірний нагрів обтікача в процесі польоту.

Розподіл температури в об'ємі оптичного елемента має нерівномірний характер в радіальному і осьовому напрямку, але в радіальному напрямку він є осесиметричний [4, 5]. Тому показник заломлення повинен залежати від двох координат: радіальної та осьової. При цьому вираз для показника заломлення із осьовим і симетричним радіальним градієнтом має вигляд [6]

$$n(h, z) = n_0 + n_{r2}h^2 + n_{r4}h^4 + n_{r6}h^6 + n_{z1}z + n_{z2}z^2 + n_{z3}z^3,$$

де  $h$  – радіальна координата;  $z$  – осьова координата.

Цей вираз був обраний для забезпечення можливості моделювання градієнтних середовищ за допомогою програми ZEMAX. Використання цієї програми потребує визначення шістьох апроксимаційних коефіцієнтів:  $n_0$ ,  $n_{r2}$ ,  $n_{r4}$ ,  $n_{r6}$ ,  $n_{z1}$ ,  $n_{z2}$  і  $n_{z3}$ .

Визначивши за формулою (1) показник заломлення у кожній точці, можна знайти двовимірну функцію показника заломлення. Вказані коефіцієнти відтворюються апроксимацією функції методом регресії з використанням для цього методу найменших квадратів.

Визначення форми деформованих оптичних поверхонь потребує дані про значення температури в кожній точці обтікача, без чого неможливо знайти просторове зміщення цих точок. Зміщені точки утворюють нову деформовану оп-

тичну поверхню. Форму деформованих поверхонь можна описати за допомогою степеневих поліномів.

Задачу температурних деформацій можна розв'язати числовими методами, які реалізовані у багатьох комп'ютерних програмах. Тому використаємо для розрахунку одну з таких програм – ELCUT [7].

Задавши вхідну геометрію тіла меніска, параметри оптичного матеріалу, тепловий потік, граничні умови і, розв'язавши вказану задачу, отримуємо, геометричну форму меніска із урахуванням розподілу температури в тілі меніска.

У програмі ZEMAX осесиметрична поліноміальна асферична поверхня визначається додаванням полінома до формули сфери, він описує відхилення від номінальної (сферичної або асферичної) поверхні. Номінальна поверхня своєю вершиною повинна бути у початку координат.

При моделюванні в ZEMAX деформовані оптичні поверхні представимо як поверхні з парною асферою [6]

$$z(h) = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + \alpha_1h^2 + \alpha_2h^4 + \alpha_3h^6 + \alpha_4h^8 + \alpha_5h^{10} + \alpha_6h^{12} + \alpha_7h^{14} + \alpha_8h^{16},$$

де  $c$  – кривизна поверхні;  $k$  – конічний коефіцієнт;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \alpha_7, \alpha_8$  – коефіцієнти асферики.

Через те, що вершини номінальної поверхні 1 і деформованої поверхні  $z(h)$  (рис. 1) не знаходяться в початку однієї системи координат, описати деформовану поверхню за допомогою номінальної поверхні 1 неможливо. Тому систему координат потрібно перенести на величину деформації на оптичній осі, це буде вершина номінальної поверхні 2. Внаслідок перетворень отримуємо функцію, що описує асферичну поверхню, яка представляє температурну деформовану поверхню. Цю функцію апроксимуємо методом найменших квадратів і отримуємо необхідні коефіцієнти асферики.

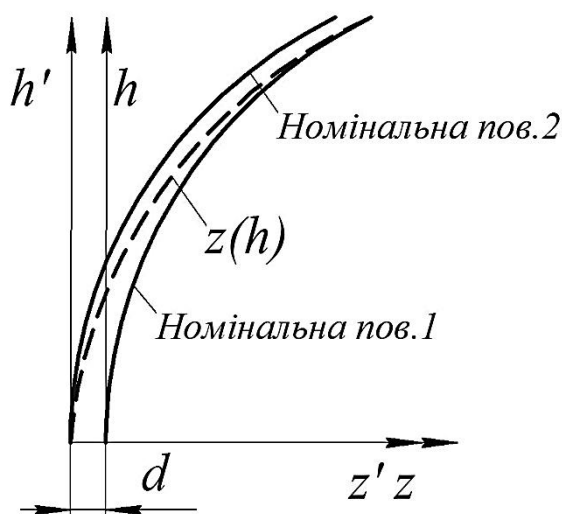


Рис. 1. Графіки до пояснення моделювання асферичної поверхні в ZEMAX

При моделюванні всієї оптичної системи головки самонаведення важливо врахувати осьове переміщення системи координат (рис.1).

### Результати дослідження

Для температурного поля, представленого у роботі [4], на прикладі обтікача виготовленого із оптичної кераміки КО12 або із сапфіра, був проведений розрахунок градієнта показника заломлення, який залежить від радіальної та осової координати, а також було знайдено форму деформації поверхні. Результати розрахунків наведені у табл. 1 – 4.

Таблиця 1. Коефіцієнти  $n_0$ ,  $n_{r2}$ ,  $n_{r4}$ ,  $n_{z1}$ ,  $n_{z2}$  і  $n_{z3}$  для моделювання середовища із градієнтним розподілом показника заломлення (для довжини хвилі 4,8 мкм)

Матеріал		КО12 (MgF <sub>2</sub> )		Сапфір (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
Час, с		1	11	1	11
Коефіцієнти	$n_0$	1.337333	1.337505	1.635918	1.637625
	$n_{r2}$	$1.437 \times 10^{-9}$	$1.041 \times 10^{-7}$	$4.839 \times 10^{-9}$	$6.075 \times 10^{-7}$
	$n_{r4}$	$-5.002 \times 10^{-13}$	$-3.600 \times 10^{-11}$	$-1.671 \times 10^{-12}$	$-2.070 \times 10^{-10}$
	$n_{z1}$	$1.214 \times 10^{-5}$	$4.763 \times 10^{-5}$	$1.526 \times 10^{-5}$	$1.573 \times 10^{-5}$
	$n_{z2}$	$-1.006 \times 10^{-5}$	$-5.666 \times 10^{-5}$	$-1.455 \times 10^{-5}$	$-6.491 \times 10^{-5}$
	$n_{z3}$	$2.147 \times 10^{-6}$	$1.247 \times 10^{-5}$	$3.119 \times 10^{-6}$	$1.474 \times 10^{-5}$

Коефіцієнт  $n_{r6}$  виявився рівним нулю.

Таблиця 2. Коефіцієнти  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  для моделювання асферичних поверхонь у ZEMAX

Матеріал	Час, с	Поверхня	$\alpha_1$	$\alpha_2$
КО12 (MgF <sub>2</sub> )	1	Зовн.	$1.062 \times 10^{-6}$	$2.471 \times 10^{-9}$
		Внутр.	$1.071 \times 10^{-6}$	$2.898 \times 10^{-9}$
	11	Зовн.	$2.024 \times 10^{-6}$	$6.019 \times 10^{-9}$
		Внутр.	$1.784 \times 10^{-6}$	$5.578 \times 10^{-9}$
Сапфір (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1	Зовн.	$8.456 \times 10^{-7}$	$1.034 \times 10^{-9}$
		Внутр.	$6.264 \times 10^{-7}$	$1.312 \times 10^{-9}$
	11	Зовн.	$6.683 \times 10^{-7}$	$1.935 \times 10^{-9}$
		Внутр.	$6.194 \times 10^{-7}$	$2.067 \times 10^{-9}$

Коефіцієнти  $\alpha_3$ - $\alpha_8$  дорівнюють нулю.

Таблиця 3. Зміна фокусної відстані обтікача під впливом градієнтного розподілу показника заломлення  $n(h, z)$  та під впливом деформації оптичної поверхні  $z(h)$

Матеріал	Нормальні умови	1-а с. $n(h, z)$	11-а с. $n(h, z)$	1-а с. $z(h)$	11-а с. $z(h)$
КО12 (MgF <sub>2</sub> )	-4519.63	-4517.89	-4515.67	-4522.8	-4507.86
Сапфір (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-2933.79	-2932.58	-2931.21	-2936.28	-2933.83

Таблиця 4. Зміна заднього фокального відрізка обтікача під впливом градієнтного розподілу показника заломлення  $n(h, z)$  та під впливом деформації оптичної поверхні  $z(h)$

Матеріал	Нормальні умови	1-а с. $n(h, z)$	11-а с. $n(h, z)$	1-а с. $z(h)$	11-а с. $z(h)$
КО12 (MgF <sub>2</sub> )	-4462.63	-4460.90	-4458.70	-4465.75	-4450.74
Сапфір (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	-2876.79	-2875.58	-2874.15	-2879.21	-2876.79

### **Висновки**

Градієнт показника заломлення в масі обтікача виникає в осьовому і в радіальному напрямку. Максимальне значення осьового градієнта припадає на кути 30-32°.

Градієнт показника заломлення обтікача з КО12 менший ніж з сапфіру, хоча градієнт температури навпаки більший. Це пояснюється тим, що температурний коефіцієнт показника заломлення КО12 менший ніж у сапфіра.

Деформація робочих поверхонь обтікача з КО12 більша ніж з сапфіра, тому що механічні та теплофізичні характеристики КО12 поступаються аналогічним сапфіра.

Деформація оптичних поверхонь обтікача має більший вплив на фокусну відстань, ніж градієнт показника заломлення.

Отримані результати дають уявлення про зміни фізичних параметрів обтікача, які практично неможливо дослідити експериментально. На основі отри-

маних даних можна зробити об'єктивну оцінку погіршення функціональних параметрів оптико-електронного координатора цілі.

### **Література**

1. Орлов С.В. Математична модель навігації літальних апаратів, включаючи парирування додаткових кутових похибок внесених гострокінцевим антенним обтікачем, обумовлених аеродинамічним нагрівом / С.В. Орлов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. – 3 (7). – С. 77 – 79.
2. Лазарев Л.П. Інфрачервоні світлові прилади самонаведення і наведення літальних апаратів: Підручник для студентів вузів. – М.: Машиностроение, 1966. – 383 с.
3. Якушенко Ю.Г. Теорія і розрахунок оптико-електронних приладів: Підручник для студентів вузів. – 4-е вид., перероб. і доп. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
4. Кузьменко Б. М. Розрахунок нестационарного температурного поля обтікача головки самонаведення / Б. М. Кузьменко, О. А. Ткаченко, І. Г. Чиж // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 35 – 43.
5. Орлов С.В. Результати розрахунку нестационарного температурного поля різних форм обтікачів антени перспективних надзвукових літальних апаратів / С.В. Орлов // Системи обробки інформації. – 2009. – 6 (80). – С. 86 – 88.
6. ZEMAX. Керівництво користувача. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://optdesign.narod.ru/zemax/zemax\\_rus.pdf](http://optdesign.narod.ru/zemax/zemax_rus.pdf)
7. ELCUT. Версія 5.10: Керівництво користувача. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://elcut.ru/demo/manual.pdf>

*Надійшла до редакції  
12 квітня 2013 року*

© Кузьменко Б. М., Ткаченко О. А., Чиж І. Г., 2013