

## НАУКОВІ ТА ПРАКТИЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИРОБНИЦТВА ПРИЛАДІВ ТА СИСТЕМ

УДК 621.338.27:537.221

### ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОДІЙ НА ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ ТОЧНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

<sup>1)</sup>Яценко І. В., <sup>2)</sup>Антонюк В. С., <sup>1)</sup>Ващенко В. А., <sup>3)</sup>Кіріченко О. В.

<sup>1)</sup>Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна; <sup>2)</sup>Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна;

<sup>3)</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

E-mail: [victor.antoniuk@gmail.com](mailto:victor.antoniuk@gmail.com)

Метою роботи є розробка нелінійних математичних моделей зовнішніх термодій на оптичні елементи у вигляді плоских пластин різної товщини, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу (об'ємної теплоємності та коефіцієнта теплопровідності) та дозволяють знаходити критичні значення їх параметрів. Розроблено нелінійні математичні моделі зовнішніх термодій на оптичні пластини різної товщини, що дозволяють знаходити розподіли температури та термопружних напружень по їх товщині. Визначено критичні значення параметрів зовнішніх термодій (теплових потоків, часу їх дії), перевищення яких призводить до руйнування оптичних елементів (поява тріщин, сколів та ін. дефектів) та виходу з ладу приладів на їх основі.

**Ключові слова:** оптичний елемент, зовнішні термічні впливи, електронний промінь.

#### Вступ

Сучасні прилади з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи (вхідні захисні вікна та плоскі дзеркала у прицілах для спостереження у видимій та ІЧ областях спектра, плоскі елементи стикових вузлів у оптичних світловодах для медичних приладів діагностики та лікування, підкладки світлофільтрів ІЧ-приладів тощо) при зберіганні, транспортуванні та застосуванні піддаються інтенсивним зовнішнім термодіям (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски, ударні термодії в умовах пострілу та польоту) [1 – 5].

У вказаних умовах відбувається суттєва зміна властивостей поверхневих шарів оптичних елементів аж до їх руйнування (поява тріщин та сколів, глибоке поверхнєве оплавлення пластин з утворенням напливів, хвилеподібних поверхонь та зміни геометричної форми та ін. дефектів), що призводить до суттєвого погіршення техніко-експлуатаційних характеристик приладів та їх виходу з ладу.

Тому суттєвого значення набуває попередження вимушених руйнувань оптичних елементів у разі впливу зовнішніх термічних дій. Вони повинні базуватись на науково-обґрунтованих методах визначення критичних значень параметрів термічних впливів на оптичні елементи, перевищення яких призводить до їх передчасного руйнування.

Розробка таких методів вимагає проведення теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагріву оптичних елементів різної форми (плоских, подвійної кривизни, циліндричних та сферичних елементів тощо), а також для різних значень зовнішніх теплових потоків та часів їх дії. Нині впливи зовнішньої термічної дії на оптичні елементи різної геометричної форми вивчені недостатньо: відсутні методи знаходження критичних значень параметрів зовнішніх термодій, що базуються на гранично допустимих значеннях термопружних напружень у вказаних оптичних елементах [1, 6].

Тому метою даної роботи є розробка нелінійних математичних моделей зовнішніх термодій на оптичні елементи у вигляді плоских пластин різної товщини, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу (об'ємної теплоємності  $C_V(T)$  та коефіцієнта теплопровідності  $\lambda(T)$ ) та дозволяють знаходити критичні значення їх параметрів.

#### Результати досліджень та їх аналіз

Для дослідження впливу параметрів зовнішніх термодій (теплого потоку  $q_n$  та часу його дії  $t$ ) на робочі поверхні елементів з оптичного скла (К8, К108, К208, БК10, ТФ110) та керамік (КО1, КО2, КО3, КО5, КО12) використовувались пластини товщиною  $H = 2 \dots 6 \cdot 10^{-3}$  м, основні фізико-

механічні характеристики яких можна знайти у роботах [2, 7, 8].

Теоретичні дослідження розподілів температури та термопружних напружень по товщині оптичних пластин проводились за допомогою відомих методів теорії теплопровідності та термопружності [9 – 12].

Експериментальні дослідження з визначення критичних значень  $q_n^*$  та  $t^*$  проводились на стандартному обладнанні з використанням керованого ІЧ-нагріву оптичних пластин кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з використанням термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні пластини в діапазоні 300...1900 К [2, 6] та зовнішнього теплового потоку, що поступає на неї у розглядуваному діапазоні зміни потоку.

Для знаходження розподілів температури та термопружних напружень у оптичних пластинах було розроблено наступні математичні моделі.

#### Математична модель процесу нагріву плоскої пластини малої товщини.

При зовнішній тепловій дії на поверхню пластини поступає рівномірно розподілений тепловий потік  $q_n(t)$  (рис. 1).

Водночас, розглядається пластинка, для якої  $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$  (одномірність розподілу тепла углиб пластини), а також глибина зони термодії  $\delta \approx \sqrt{2 \cdot a_0^2 \cdot \tau}$  ( $\delta = 2 \cdot \sqrt{a_0^2 \cdot \tau}$ , де  $a_0^2$  – коефіцієнт теплопровідності оптичного матеріалу ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  $\tau$  – час зовнішньої теплової дії, с) [6], тобто враховується теплообмін на нижньому боці пластини.

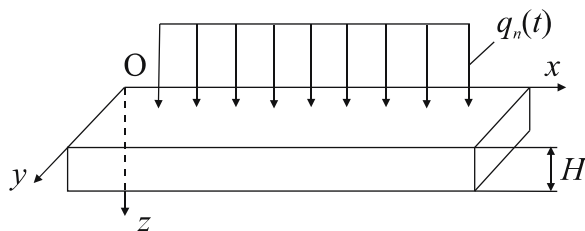


Рис. 1. Схема нагріву оптичної пластини зовнішньою тепловою дією:  $H$  – товщина пластини,  $m$ ;  $q_n(t)$  – зовнішній тепловий потік,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ .

Також вважається, що тепловтрати за рахунок випромінювання мізерно малі внаслідок малих значень температури поверхні пластини (не більше 1000...1500 К) [2, 6].

Таким чином, розглядається така одномірна, нестационарна та нелінійна математична модель поверхневого нагріву пластини [9, 10]:

$$C_v(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \right), \quad 0 < z < H, t > 0, \quad (1)$$

$$T(z,t)|_{t=0} = T_0, \quad (2)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = q_n(t), \quad (3)$$

$$\lambda(T(z,t)) \cdot \frac{\partial T(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (4)$$

де  $T(z,t)$  – температура в різних точках  $z$  по товщині пластини в різні моменти часу  $t$ ,  $T_0$  – початкова температура пластини, К.

Враховуючи експериментально встановлені емпіричні залежності [2, 8]

$$C_v(\dot{O}) = \tilde{N}_{v_0} \cdot T^v, \quad \lambda(\dot{O}) = \lambda_0 \cdot T^v \quad (5)$$

( $C_{v_0}$ ,  $\lambda_0$ ,  $v$  – емпіричні константи, що залежать від природи оптичного матеріалу) і роблячи заміну змінних

$$\theta(z,t) = T(z,t)^{v+1} - T_0^{v+1}, \quad (6)$$

одержуємо наступну лінеаризовану систему рівнянь

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta(z,t)}{\partial z^2}, \quad (7)$$

$$\theta(z,t)|_{t=0} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=H} = \bar{q}_n(t), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \theta(z,t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (10)$$

$$\text{де } \bar{q}_n = \frac{v+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t), \quad a_0^2 = \frac{\lambda_0}{C_{v_0}}. \quad (11)$$

Розв'язуючи задачу (7) – (10) за допомогою косинус-перетворення Фур'є (по змінній  $z$ ) [9, 10], а також враховуючи  $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$ , одержуємо:

$$T(z,t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) \cdot \bar{q}_n}{\lambda_0} \cdot \left[ \frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos \frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{n^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H}\right)^2 t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \quad (12)$$

#### Математична модель процесу нагріву плоскої пластини великої товщини.

Сумарний тепловий потік передбачається рівномірно розподіленим на поверхні пластини (див. рис. 1).

Передбачається, що  $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} \approx 0$  (одномірність розповсюдження тепла вглиб пластини) та  $\delta = 2 \cdot (a_0^2 \cdot \tau)^{1/2} \ll H$  (теплові впливи є поверхне-

вими, а теплообмін на нижньому боці пластини не враховується).

Рівняння математичної моделі нагріву пластини мають вигляд [9, 10]:

$$C_V(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad 0 < z < +\infty, \quad (13)$$

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_i(t), \quad (14)$$

$$T|_{t=0} = T_0, \quad (15)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \rightarrow 0 \quad \text{при } z \rightarrow +\infty. \quad (16)$$

Враховуючи залежності  $C_V(T)$  та  $\lambda(T)$  (5) та роблячи заміну змінних (6), отримуємо наступну лінеаризовану систему рівнянь:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (17)$$

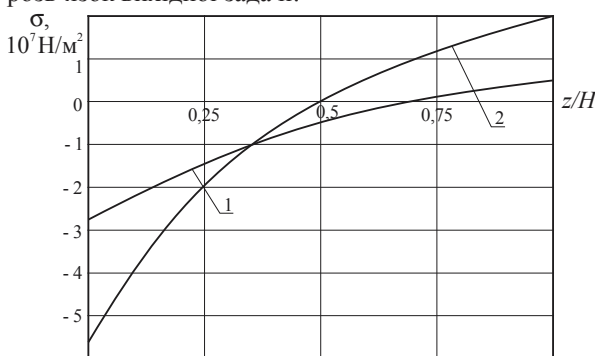
$$\theta|_{t=0} = 0, \quad (18)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(t), \quad (19)$$

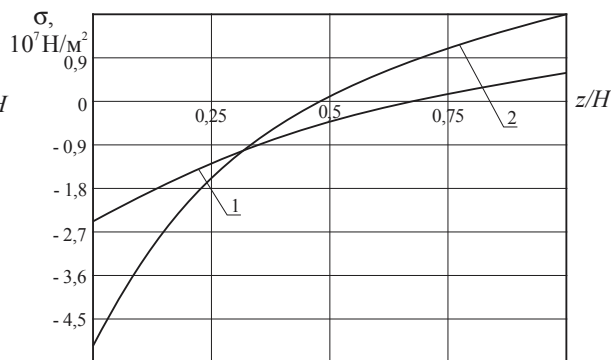
$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при } z \rightarrow +\infty,$$

$$\bar{q}_n(t) = \frac{\nu+1}{\lambda_0} \cdot q_n(t) \quad (20)$$

Використовуючи для рішення системи рівнянь (17) – (20) косинус-перетворення Фур'є (по змінній  $z$ ) [9, 10], а також з враховуючи  $q_n(t) = q_{n0} = const$ , одержуємо наступний розв'язок вихідної задачі:



а)



б)

Рис. 2. Розподіл термічних напружень по товщині плоскої пластини з оптичного скла К8 та ТФ110 залежно від зовнішнього теплового потоку  $q_{n0}$  ( $T_0 = 300$  К;  $t = 0,5$  с): 1 –  $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; а) пластинка малої товщини з оптичного скла К8; б) пластинка великої товщини з оптичного скла ТФ110.

При зміні параметрів зовнішніх термодій величина  $|\sigma|_{\max}$  може досягати критичних значень  $\sigma^*(q_n^*, t^*)$  ( $q_n^*$ ,  $t^*$  – значення параметрів зовнішніх

$$T(z,t) = \left[ T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot a_0 \cdot q_{n0}}{\sqrt{\pi} \cdot \lambda_0} \cdot \int_0^t \frac{e^{-\frac{z^2}{4a_0^2(t-\tau)}}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \right]^{\frac{1}{\nu+1}}. \quad (21)$$

У випадку, що розглядається, виникнення термопружних напружень пов'язано з градієнтом температури по товщині пластини (уздовж Oz), а їх величина  $\sigma(z,t)$  має вигляд [11, 12]:

$$\sigma(z,t) = \frac{\alpha_V \cdot E}{1-\nu} \left( -T(z,t) + \frac{2}{H^2} \cdot (2H-3z) \times \int_0^H T(z,t) dz - \frac{6}{H^3} \cdot (H-2z) \cdot \int_0^H z \cdot T(z,t) dz \right), \quad (22)$$

де  $\alpha_V$  – коефіцієнт термічного розширення, К<sup>-1</sup>;  $\bar{\nu}$  – коефіцієнт Пуассона;  $E$  – модуль пружності Юнга, Н/м<sup>2</sup>.

В результаті проведених розрахунків (рис. 2 – 9) було встановлено, що по товщині плоскої пластини термічні напруження істотно нерівномірні: поблизу її поверхні мають місце стискаючі ( $\sigma < 0$ ,  $|\sigma|_{\max} = 4,8 \cdot 10^7 \dots 5,3 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> – для оптичного скла та  $|\sigma|_{\max} = 1,7 \cdot 10^8 \dots 2,4 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup> – для оптичних керамік), а на нижньому боці – розтяжні ( $\sigma > 0$ ,  $|\sigma|_{\max} = 1,2 \cdot 10^7 \dots 1,7 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup> – для оптичного скла та  $|\sigma|_{\max} = 0,7 \cdot 10^8 \dots 1,5 \cdot 10^8$  Н/м<sup>2</sup> – для оптичних керамік) [2, 7, 8].

Водночас, ступінь впливу параметрів зовнішніх термодій наступний: збільшення часу теплової дії від  $t = 2$  с до  $t = 14$  с призводить до зростання  $|\sigma|_{\max}$  у 1,8...4,2 разу – для оптичного скла та у 1,5...3,7 разу – для оптичних керамік.

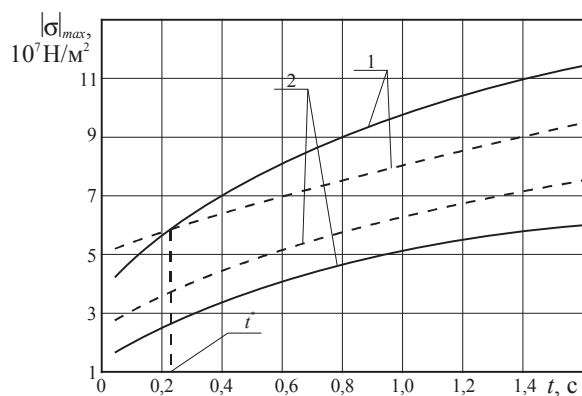
термодій, при яких виконується умова  $|\sigma|_{\max} = \sigma^*$ , перевищення яких призводить до руйнування верхнього боку оптичної пластини (для усіх дослі-

джуваних діапазонів зміни параметрів руйнування нижнього боку пластини не виникає).

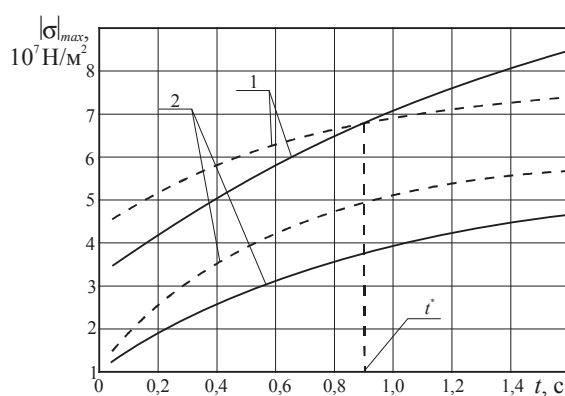
Встановлено взаємну однозначну відповідність між параметрами  $q_n^*$  та  $t^*$ : для оптичного скла – збільшення значень  $t^*$  від 0,25 с до 1, 4 с призводить до зменшення значень  $q_n^*$  від  $2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> до  $1,4 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, а для оптичних керамік – збільшення значень  $t^*$  від 0,5 с до 1,4 с призводить

до зменшення значень  $q_n^*$  від  $2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> до  $2,1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Зіставлення результатів розрахунків (див. рис. 5, 9) з експериментальними даними показало, що розходження між ними не перевищують 7...9 %.

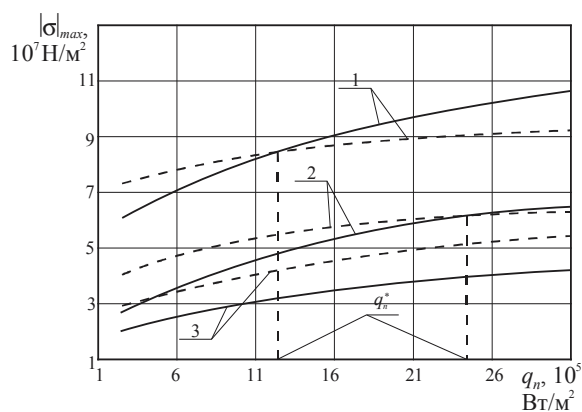


а)

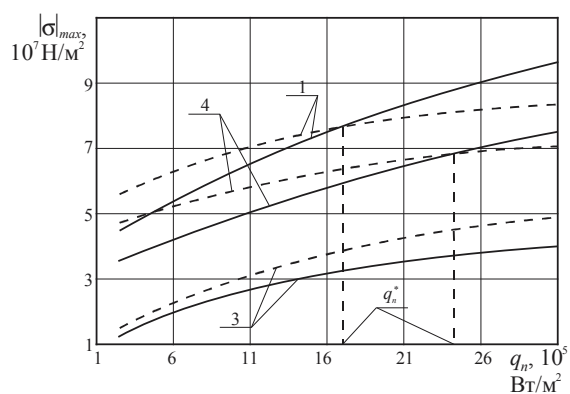


б)

Рис. 3. Залежність модуля максимальних термомпружних напружень  $|\sigma|_{max}$  у плоскій пластині з оптичного скла К8 та ТФ110 від часу зовнішньої теплової дії для різних значень зовнішнього теплового потоку ( $T_0 = 300$  К): 1 –  $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>; а) пластина малої товщини з оптичного скла К8; б) пластина великої товщини з оптичного скла ТФ110; ——— – результати розрахунків; - - - – межа міцності оптичного матеріалу  $\sigma^*$ .



а)



б)

Рис. 4. Залежність модуля максимальних термічних напружень  $|\sigma|_{max}$  у плоскій пластині з оптичного скла К8 та ТФ110 від зовнішнього теплового потоку для різних часів його дії ( $T_0 = 300$  К): 1 –  $t = 1,4$  с; 2 –  $t = 0,2$  с; 3 –  $t = 0,85$  с; 4 –  $t = 0,1$  с; а) пластина малої товщини з оптичного скла К8; б) пластина великої товщини з оптичного скла ТФ110;  $q_n^*$  – критичні значення зовнішнього теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>; ——— – результати розрахунків; - - - – межа міцності оптичного матеріалу  $\sigma^*$ .

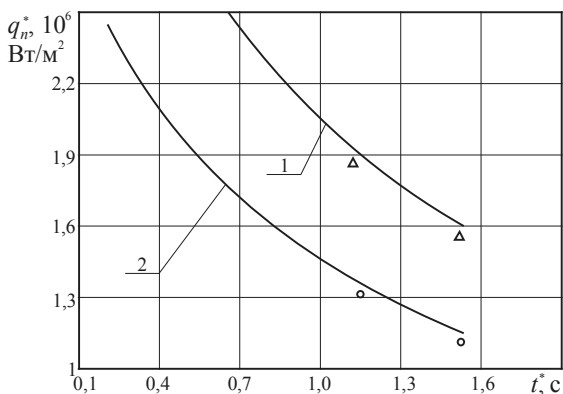
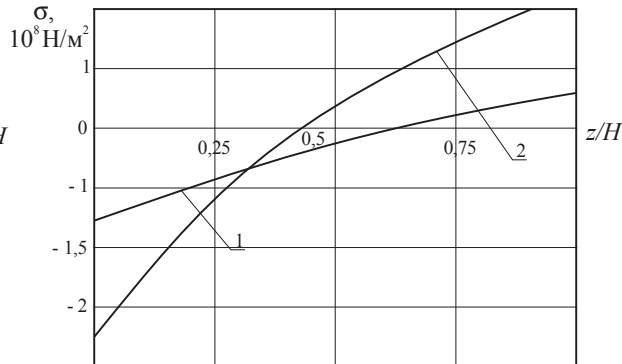
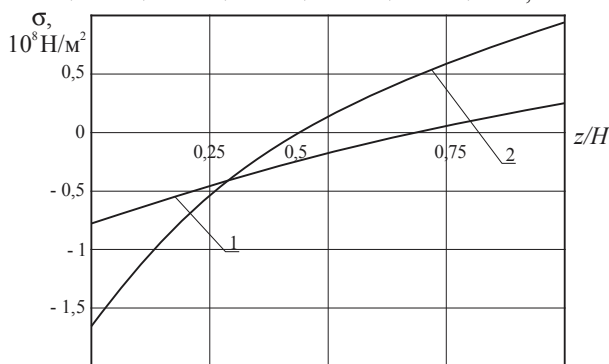


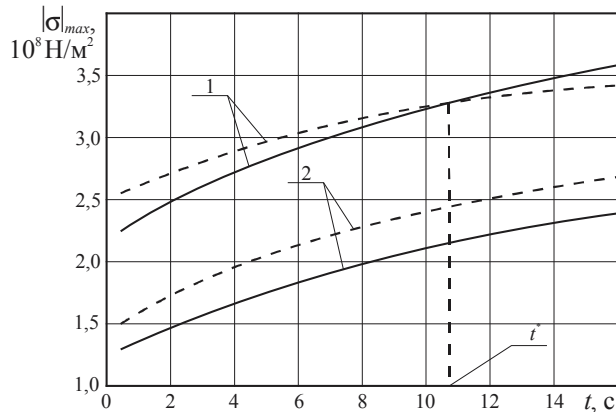
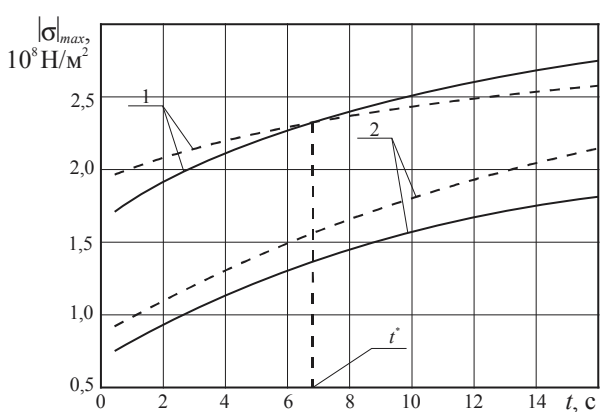
Рис. 5. Взаємозв'язок критичних значень зовнішнього теплового потоку  $q_n^*$  та часу його дії  $t^*$  на плоску пластину з оптичного скла ТФ110 та К8 ( $T_0 = 300$  К): 1 – пластина великої товщини з оптичного скла ТФ110; 2 – пластина малої товщини з оптичного скла К8; o, Δ – експериментальні дані.



а)

б)

Рис. 6. Розподіл термічних напружень по товщині плоскої пластини з оптичних керамік КО2 та КО12 залежно від зовнішнього теплового потоку  $q_{n0}$  ( $T_0 = 300$  К;  $t = 0,5$  с): 1 –  $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>; а) пластина малої товщини з оптичної кераміки КО2; б) пластина великої товщини з оптичної кераміки КО12.



а)

б)

Рис. 7. Залежність модуля максимальних термопружних напружень  $|\sigma|_{max}$  у плоскій пластині з оптичних керамік КО2 та КО12 для різних значень зовнішнього теплового потоку ( $T_0 = 300$  К): 1 –  $q_{n0} = 2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>; 2 –  $q_{n0} = 1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>; а) пластина малої товщини з оптичної кераміки КО2; б) пластина великої товщини з оптичної кераміки КО12; ——— – результати розрахунків; - - - - - межа міцності оптичного матеріалу  $\sigma^*$ .

Методи визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи можуть бути використані при проектуванні, виготовленні та умовах обігу приладів з оптичними елементами для вимірювання та теплового контролю об'єктів різної фізичної природи (наприклад,

лазерних тепловізійних прицільних комплексів з оптичними вхідними захисними вікнами, лазерних терапевтичних та хірургічних приладів з оптоволоконними світловодами, ГЧ-приладів наведення та спостереження з оптичними обтічниками тощо).



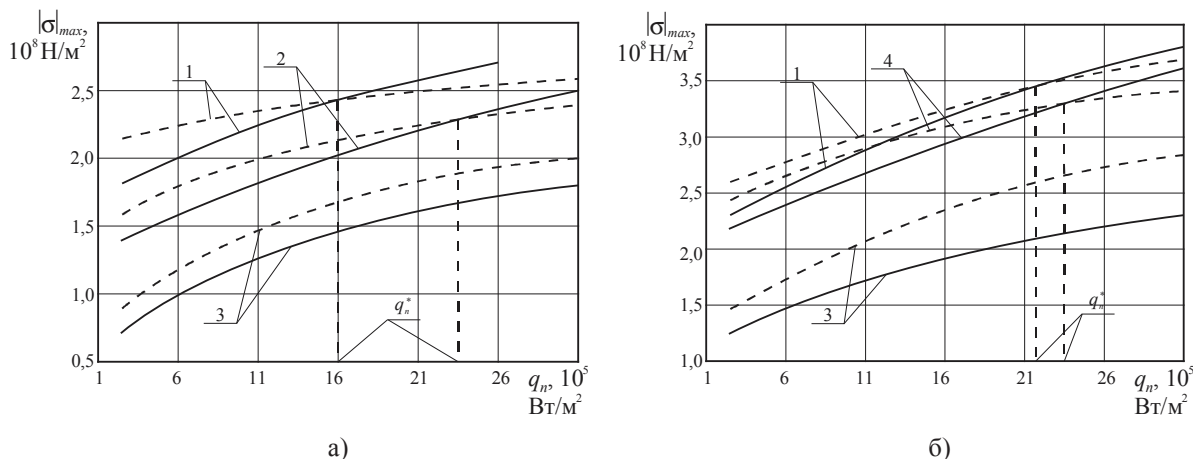


Рис. 8. Залежність модуля максимальних термічних напружень  $|\sigma|_{\max}$  у плоскій пластині з оптичних керамік КО2 та КО12 від зовнішнього теплового потоку для різних часів його дії ( $T_0 = 300$  К): 1 –  $t = 14$  с; 2 –  $t = 7$  с; 3 –  $t = 0,5$  с; 4 –  $t = 11$  с; а) пластина малої товщини з оптичної кераміки КО2; б) пластина великої товщини з оптичної кераміки КО12; ——— – результати розрахунків; - - - - - межа міцності оптичного матеріалу  $\sigma^*$ .

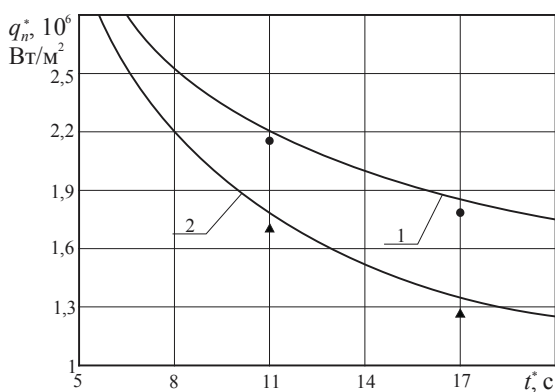


Рис. 9. Взаємозв'язок критичних значень зовнішнього теплового потоку  $q_n^*$  та часу його дії  $t^*$  на плоску пластину з оптичних керамік КО2 та КО12 ( $T_0 = 300$  К): 1 – пластина великої товщини з оптичної кераміки КО12; 2 – пластина малої товщини з оптичної кераміки КО2; ●, ▲ – експериментальні дані.

Розроблені методи визначення критичних значень параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи дозволяють попереджати можливі відмови при їх експлуатації з врахуванням впливу зовнішніх термодій на їх оптичні елементи шляхом визначення критичних значень їх параметрів, а також покращувати основні техніко-експлуатаційні характеристики приладів (надійність, строк служби тощо).

**Висновки**

1. Розроблено нелінійні математичні моделі зовнішніх термодій на оптичні пластини різної товщини, які враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалів (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності) та

дозволяють визначати розподіли температури та термопружних напружень по товщині пластини (відносна похибка 7...9 %).

2. Вперше встановлено наступний вплив параметрів зовнішніх термодій (теплового потоку  $q_n$  та часу його дії  $t$ ) на величину максимальних термопружних напружень у розглядуваних пластинках: збільшення  $q_n$  від  $1,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> до  $2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> та  $t$  від 0,2 с до 1,5 с призводить до зростання максимальних термопружних напружень у 1,8...4,3 разу для оптичного скла та у 1,5...3,8 разу – для оптичних керамік.

3. Вперше встановлено критичні діапазони зміни параметрів зовнішніх термодій ( $q_n^*$ ,  $t^*$ ), які залежать від природи оптичних матеріалів, перевищення яких призводить до руйнування оптичних пластин та виходу з ладу приладів на їх основі.

4. Використання нелінійних математичних моделей зовнішніх термодій на оптичні елементи, дозволяє формувати необхідну для практичного використання базу даних по критичним діапазонам зміни параметрів зовнішніх термодій на оптичні елементи приладів та керованих параметрів електронного променя, що покращують властивості поверхневих шарів, перевищення яких призводить до руйнування елементів та виходу з ладу приладів.

**Література**

1. Ващенко В. А. Тепловые процессы при электронной обработке оптических материалов и эксплуатации изделий на их основе. Монография / В. А. Ващенко, Д. И. Котельников, Ю. Г. Лега, Д. М. Краснов, И. В. Яценко, О. В. Кириченко. – К.: Наукова думка, 2006. – 368 с.
2. Ващенко В. А. Основи електронної обробки виробів з оптичних матеріалів. Монографія. /

- В. А. Ващенко, І. В. Яценко, Ю. Г. Лега, О. В. Кириченко. – К.: Наукова думка, 2011. – 562 с.
3. Глущенко А. Р. Танковые ночные системы и приборы наблюдения / А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. В. Бурак, А. Ю. Денисенко. – Черкассы: Фотоприбор, 2007. – 441 с.
  4. Глущенко А. Р. Лазерные системы танковых прицелов / А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. А. Бурковский и др. – Черкассы: Маклаут, 2009. – 600 с.
  5. Бонусь М. Н. Современные аспекты лазерной терапии / М. Н. Бонусь, А. И. Гладкова, С. А. Горбатюк и др. – Черкассы: Вертикаль, 2011. – 608 с.
  6. Ващенко В. А. Основы теплоперенесения в элементах оптического приладобудування. Навчальний посібник. / В. А. Ващенко, В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, І. В. Яценко, М. О. Бондаренко, О. В. Кириченко, М. П. Рудь. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – 412 с.
  7. Панов В. А. Справочник конструктора оптико-механических приборов / В. А. Панов, М. Я. Кругер, В. В. Кулагин и др. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.
  8. Окатов М. А. Справочник оптика-технолога / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. Б. Байгожин. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
  9. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
  10. Карташов Э. М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1985. – 324 с.
  11. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. – К.: Наукова думка, 1970. – 307 с.
  12. Вигак В. М. Управление температурными напряжениями и перемещениями. – К.: Наукова думка, 1988. – 312 с.

УДК 621.338.27:537.221

<sup>1</sup>И. В. Яценко, <sup>2</sup>В. С. Антонюк, <sup>1</sup>В. А. Ващенко, <sup>3</sup>О. В. Кириченко<sup>1</sup>Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина;<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина;<sup>3</sup>Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, г. Черкассы, Украина

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНИХ ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТОЧНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Целью данной работы является разработка нелинейных математических моделей внешних термовоздействий на оптические элементы в виде плоских пластин различной толщины, учитывающих температурные зависимости теплофизических свойств материала (объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности) и позволяющих находить критические значения их параметров. Разработаны нелинейные математические модели внешних термовоздействий на оптические пластины разной толщины, позволяющие находить распределения температуры и термоупругих напряжений по их толщине. Определены критические значения параметров внешних термовоздействий (тепловых потоков, времен их действия), превышение которых приводит к разрушению оптических элементов (появление трещин, сколов и др. дефектов) и выходу из строя приборов на их основе.

**Ключевые слова:** оптический элемент, внешние термические воздействия, электронный луч.

<sup>1</sup>I. V. Yatsenko, <sup>2</sup>V. S. Antonyuk, <sup>1</sup>V. A. Vashchenko, <sup>3</sup>O. V. Kyrychenko<sup>1</sup>Cherkassy state technological University, Cherkassy, Ukraine<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine<sup>3</sup>Cherkassy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chornobyl of National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

#### DETERMINATION OF CRITICAL VALUES SETTINGS EXTERNAL THERMO-INFLUENCES OPTICAL ELEMENTS FOR PRECISION ENGINEERING

The aim of this work is to develop nonlinear mathematical models of external thermo-influences on optical elements in the form of flat plates of varying thickness, taking into account temperature dependence of thermo-physical material properties (volumetric heat capacity and thermal conductivity) and allows to find the critical values of their parameters. Developed a nonlinear mathematical model of external thermo-influences on plates of different thickness, allows to find the distribution of temperature and thermo-elastic stresses in their thickness. Defined critical parame-

ters external thermo-influences (heat flux, the time of their actions), the exceeding of which leads to the destruction of the optical elements (appearance of cracks, chips and other defects) and failure of devices based on them.

**Keywords:** optical element, external thermal influences, electron beam.

Надійшла до редакції  
12 січня 2016 року

Рецензовано  
20 лютого 2016 року

© Яценко І. В., Антонюк В. С., Ващенко В. А., Кіріченко О. В., 2016

УДК 681.515.8

## НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ ПИД-ЗАКОНА В РЕГУЛЯТОРАХ ТЕМПЕРАТУРЫ

*Худякова Л. А., Шовгенюк Ю. В., Сташкевич В. Ф., Кулахметов Д. Р.*

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина*

*E-mail: [office@micra.com.ua](mailto:office@micra.com.ua)*

*Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования (ПИД-закон) в последнее время нашел широкое применение в промышленных системах автоматического регулирования. Его достоинством является высокая точность поддержания параметров объекта регулирования. К недостаткам ПИД-закон можно отнести сложность технической реализации и настройки в промышленных условиях. Однако в последнее время на рынке промавтоматики появились достаточно надежные и помехоустойчивые малогабаритные устройства, которые позволяют реализовать ПИД-закон управления.*

*В данной статье описаны соотношения для параметров ПИД-закон в условиях промышленных применений, а также рассмотрены алгоритмы автоматического расчета параметров.*

*Таким образом, применение современных микропроцессорных регуляторов с автоматическим расчетом параметров позволяет расширить сферу применения ПИД-закон в устройствах промышленной автоматике.*

**Ключевые слова:** регулятор температуры, ПИД-закон, двухпозиционный закон.

### **Введение. Постановка задачи**

Регуляторы температуры предназначены для применения в условиях промышленного производства. Специфические требования, предъявляемые к подобному оборудованию, определяются жесткими условиями эксплуатации и необходимостью обеспечения долговременной работоспособности при минимальном техническом обслуживании [1].

Устойчивость приборов к воздействию факторов окружающей среды, таких как широкий диапазон температур, механические воздействия, вибрация, воздействие агрессивных жидкостей и газов, обеспечивается применением специальных материалов корпусных деталей, надежных электронных компонентов индустриального применения, конструктивными решениями.

Долговременная стабильность работы оборудования определяется, кроме специальных схемных решений, высокой степенью автоматизации настройки и калибровки параметров оборудова-

ния. Применение в регуляторах современных микропроцессоров, позволяет большинство операций по калибровке и настройке оборудования реализовать программно, тем самым, возложив эти операции на сами приборы.

Основной задачей, которую выполняет регулятор температуры в составе промышленного оборудования, является задача поддержания определенной температуры некоторого объекта регулирования, который сам является частью данного оборудования.

Поскольку этот объект чаще всего сам выполняет какие-то функции, взаимодействуя с другими элементами оборудования и внешней средой, то его параметры могут меняться в процессе работы. Изменение теплоотдачи, теплопотерь, мощности нагревателей или массы объекта ведет к изменению температурного режима объекта регулирования.

Любой объект регулирования характеризуется определенными свойствами. Статические харак-