

Volosov, D.S.: GRUNDLAGEN DER THEORIE THERMOOPTISCHER
ABERRATIONEN

III. Thermooptische Aberrationen von Systemen aus
dünnen Gliedern

Auf der Grundlage der von uns aufgestellten Theorie thermooptischer Aberrationen [1] wird ein allgemeines Durchrechnungsverfahren für optische Systeme aus dünnen Gliedern, die bei einer Temperaturänderung nicht gestört werden, untersucht. Jedes Glied kann seinerseits eine zusammengesetzte Kombination aus mehreren dünnen Linsen sein.

1. THERMOOPTISCHE ABERRATIONEN EINES AUS DÜNNEN
GLIEDERN BESTEHENDEN SYSTEMS

Die thermooptischen Aberrationskoeffizienten der Lage und Vergrößerung - T_I und T_{II} - eines optischen Systems, das aus p dünnen Linsen besteht, können durch folgende Ausdrücke dargestellt werden [1]

; (1)

, (2)

wobei

; (1a)

. (2a)

Für die Berechnung von ΔT_I und ΔT_{II} muß die Summierung über alle $p-1$ Luftzwischenräume zwischen p Lin-

sen erstreckt werden. Die Bezeichnungen der Größen in dieser Formel wurden beibehalten [1].

Wir verallgemeinern die Formeln (1) und (2) für ein aus dünnen Gliedern bestehendes optisches System.

Angenommen, ein aus k sich berührenden dünnen Linsen bestehendes s -tes Glied eines Systems hat die optische Stärke Φ_s . Für dieses Glied lassen sich die Formeln (1) und (2) in folgender Form schreiben:

$$; \quad (3)$$

$$, \quad (3a)$$

wobei φ_j - die optische Stärke der j -ten Linse des s -ten Glieds des Systems mit der Stärke Φ_s ist:

$$. \quad (4)$$

Mit φ_j bezeichnen wir die relative Stärke der j -ten Linse, d.h. das Verhältnis der optischen Stärke der Linse - φ_j - zur optischen Stärke des Gesamtglieds - Φ_s ;

$$. \quad (5)$$

Nach Substitution in die Beziehungen (3) und (3a) erhalten wir

$$; \quad (6)$$

$$, \quad (6a)$$

wobei die Summierung über alle k Linsen des s -ten dünnen Glieds erstreckt wird.

Somit hat der Ausdruck der thermooptischen Aberrations-

koeffizienten eines Systems aus p dünnen Gliedern, die durch $(p - 1)$ Luftzwischenräume getrennt sind, die Form:

$$; \quad (7)$$

$$. \quad (8)$$

Für beide thermooptischen Aberrationskoeffizienten stand unter dem zweiten Summenzeichen derselbe, sich auf das s -te Glied beziehende Ausdruck

$$. \quad (9)$$

Die Größe V_s nennen wir den thermooptischen Hauptparameter eines dünnen Glieds.

In diesem Fall kann der Ausdruck für die thermooptischen Aberrationskoeffizienten eines aus p dünnen Gliedern bestehenden Systems - wobei diese Glieder durch $(p - 1)$ Luftzwischenräume getrennt sind - in folgender Form dargestellt werden

$$; \quad (10)$$

$$, \quad (11)$$

wobei

$$; \quad (10a)$$

$$. \quad (11a)$$

Die Größen der thermooptischen Aberrationen des Systems werden aus den Formeln [1] bestimmt

$$; \quad (12)$$

(13)

Es werden die früheren [1] Bezeichnungen der Größen beibehalten.

Wenn im Objektraum keine Aberration erfolgt ($ds_1 = 0$) und die Objektebene im Unendlichen liegt ($s_1 = \infty$), so nehmen die Formeln (12) und (13) folgende Gestalt an:

; (12a)

, (13a)

dabei wird vorausgesetzt, daß $n_1 = n'_k = 1$ ist und die thermooptischen Aberrationskoeffizienten $T_{I\infty}$ und $T_{II\infty}$ bei folgender Normierung der Anfangskoordinaten der paraxialen Hilfsstrahlen bestimmt werden:

$$f' = 1, \alpha_1 = 0, h_1 = 1, \beta_1 = 1, y_1 = x_1.$$

2. AUSDRUCK FÜR DIE THERMOOPTISCHEN ABERRATIONS- KOEFFIZIENTEN EINES ZUSAMMENGESETZTEN SYSTEMS DURCH DIE THERMOOPTISCHEN HAUPTPARAMETER SEI- NER GLIEDER

Die optische Stärke eines dünnen Glieds wird durch die einfache Abhängigkeit

(14)

ausgedrückt, wobei α_1 und α'_s - jeweils die Winkel des ersten paraxialen Strahls mit der optischen Achse vor und nach der Brechung des Strahls durch die Linsen des s-ten Glieds sind.

Nach Substitution von (14) in die Formeln (10) und

(11) finden wir

$$; \quad (15)$$

$$, \quad (16)$$

wobei mit dem Symbol V_s^* der Ausdruck

$$(17)$$

bezeichnet ist.

Für eine im Unendlichen liegende Objektebene ($\alpha_s = 0$) nimmt die Abhängigkeit (17) die Form

$$(17a)$$

an.

Unter Berücksichtigung, daß $\alpha_s' = h_s \Phi_s$, finden wir

$$. \quad (17b)$$

Wie aus den Beziehungen (4) und (5) folgt, gilt

$$. \quad \langle a \rangle$$

Folglich läßt sich der thermooptische Hauptparameter V des s -ten Glieds unter der Voraussetzung bestimmen, daß die relative optische Stärke des Glieds gleich 1 ist.

Unter Heranziehung der Beziehungen (15), (16) und (17) kann man die thermooptischen Aberrationskoeffizienten T_I und T_{II} eines Systems aus p dünnen Gliedern durch ihre Hauptparameter V ausdrücken

$$; \quad (18)$$

$$, \quad (19)$$

wobei die Parameter V der Glieder bestimmt sind unter der Voraussetzung einer im Unendlichen liegenden Objektebene und bei der Normierung $h_1 = 1$ und $f' = 1$.

3. THERMOOPTISCHER HAUPTPARAMETER EINER EINFACHEN LINSE UND EINES DOPPELLINSIGEN GLIEDS

Wie aus der Beziehung (9) folgt, kann der thermooptische Hauptparameter einer einfachen Linse, deren Brennweite gleich 1 ist, in der Form

(20)

dargestellt werden. Es ist zweckmäßig, diesen von den Glaskonstanten n_λ , β_λ^* und α^* abhängigen Parameter als Hauptcharakteristik der thermooptischen Eigenschaften optischer Gläser anzunehmen. Der Parameter V_λ weist für Strahlen mit verschiedenen Wellenlängen λ Unterschiede auf. Bei den verschiedenen Glassorten ändert sich die Größe des Parameters V_λ im sichtbaren Teil des Spektrums ungefähr innerhalb des Bereiches

(20a)

Bei einigen optischen Gläsern ist die Größe des Parameters V_λ nahe 0. Eine einfache Linse, die aus solchen Gläsern hergestellt ist, wird frei von thermooptischen Aberrationen sein; bei diesen Gläsern gilt - wie aus der Beziehung (20) folgt -

(21)

Von großem theoretischen und praktischen Interesse ist ein einfaches System, das aus zwei dicht nebeneinander angeordneten Linsen besteht.

Betrachten wir zuerst einmal das Problem der Durchrechnung eines Systems aus zwei unverkitteten Linsen. Diese Aufgabe ist insofern einfacher, als die Temperaturänderungen eines gekitteten Glieds zu erheblichen Formänderungen der brechenden Linsenflächen führen können, deren (der Formänderungen) Analyse sich als höchst schwierig erweist.

Ein zweilinsiges unverkittetes System macht es bekanntlich möglich, 3 Aberrationen zu korrigieren: die sphärische Aberration, die Koma und die chromatische Aberration der Lage. Diese Aberrationen können für jede beliebige Kombination von optischen Gläsern vom Typ der Kron- und Flintgläser korrigiert werden.

Für ein vorgegebenes Gläserpaar und eine vorgegebene Brennweite des Systems wird die chromatische Aberration bei bestimmten optischen Stärken der Linsen des Systems korrigiert. Die zusätzliche Voraussetzung für die Behebung der thermooptischen Aberration der Lage für die Wellenlänge λ führt - wie aus der Beziehung (12) folgt - zu dem Gleichungssystem

$$; \quad (22a)$$

$$; \quad (22b)$$

$$, \quad (22c)$$

wobei V_λ - der thermooptische Hauptparameter eines dünnen Glieds ist; $\bar{\varphi}_1$ und $\bar{\varphi}_2$ - die optischen Stärken der Linsen sind, reduziert auf die Brennweite des Glieds, die gleich 1 ist; für ein dünnes Objektiv aus einem einzelnen Glied ist die Größe ΔT_I in der Formel (12) oder (15) gleich 0.

Aus (22a) und der Beziehung (22b) haben wir

$$; \quad (23)$$

aus den Gleichungen (22a) und (22c) finden wir

. (23a)

Die Gleichungen (23) und (23a) bestimmen die Voraussetzung für die Wahl der Dispersionen und thermooptischen Parameter der Gläser

. (24)

Da für ein achromatisches Objektiv $C = 0$ ist, gewinnen wir aus (24)

. (24a)

Wenn die thermooptische Aberration der Lage behoben ist ($T_I = 0$), dann gilt

. (25)

Die Bedingung (24a) nimmt in diesem Fall die Form

(26)

an.

Das wird auch die Voraussetzung für die Wahl der thermooptischen Parameter für Gläser sein, die eine Korrektur der thermooptischen Aberration für die Wellenlänge einer achromatischen Doppellinse sicherstellen.

Man muß hierbei beachten, daß eine Korrektur dieser Aberration nur dann zweckmäßig ist, wenn bei den Temperaturänderungen eine Beständigkeit der Entfernung des Objektivs von der Rezeptorebene des Bildes erreicht ist. Letzteres kann insbesondere durch die Verwendung eines Materials mit einem kleinen Temperatur-Ausdehnungskoeffizien-

ten (z.B. Invar) für die Fertigung des Objektivgehäuses erreicht werden oder durch Benutzung eines bestimmten noch komplizierteren Geräts, das die Änderung der Entfernung zwischen dem Objektiv und dem Rezeptor des Bildes bei einer Temperaturänderung ausgleicht. Ein derartiges Gerät, das das optische System mit dem Rezeptor des Bildes verbindet, kann insbesondere bei Benutzung zweier oder mehrerer Metalle oder anderer Materialien mit verschiedenen Ausdehnungskoeffizienten eingesetzt werden.

Wenn es bei der Temperaturänderung zu einer Verringerung oder Vergrößerung der Entfernung vom Objektiv zu einer bestimmten fixierten (unbeweglichen) Rezeptorebene des Bildes kommen sollte, so soll die Entfernungsänderung durch die Einführung der thermooptischen Aberration des Objektivs ausgeglichen werden. In diesem Falle ist offensichtlich $T_I \neq 0$ und folglich die Größe V_R in der Formel (24a) nicht gleich 0.

Es wird angenommen, der Abstand a zwischen dem Objektiv und der Rezeptorebene des Bildes habe sich um die Größe Δa infolge eines Absinkens oder Ansteigens der Temperatur von 20°C auf t geändert, d.h.

, (27)

wobei γ^* - der lineare Ausdehnungskoeffizient des Gehäusematerials ist.

Die Größe der thermooptischen Aberration des Objektivs für eine im Unendlichen liegende Objektebene wird durch die Formel [1]

(28)

ausgedrückt, worin f' - die Brennweite des Objektivs ist.

Zur Beseitigung des Effekts einer Temperaturverlagerung der Bildebene hinsichtlich der Rezeptorebene muß

offensichtlich die Bedingung [1]

(29)

erfüllt werden.

Unter Benutzung der Beziehungen (27) - (29) und bei der Annahme $a = f'$ finden wir

(30)

Nach Substitution in die Gleichung (24a) erhalten wir

(31)

Das ist die Bedingung für die Wahl der Dispersionen und thermooptischen Konstanten für Gläser, die gewährleisten, daß ein achromatisches Doppelobjektiv - wenn der Ausdehnungskoeffizient des Gehäusematerials gegeben ist - durch Temperaturänderungen nicht gestört wird.

Eine solche Aufgabe läßt sich - wie weiter unten gezeigt wird - höchst einfach lösen. Außerdem handelt es sich nicht um eine partikuläre Lösung, da eine große Gruppe von Berechnungsaufgaben für kompliziertere optische Systeme auf die Berechnung eines Doppelobjektivs hinausläuft. Folgende graphisch-analytische Lösungsmethode wird vorgeschlagen.

An der Abszissenachse eines rechtwinkligen Koordinatensystems werden die Dispersionszahlen ν_{F-C} (Zeichnung 1) der optischen Gläser abgetragen; an der Ordinatenachse - die Produkte $\nu_{F-C} \nu_D$ der entsprechenden Gläser, 10^5 mal vergrößert. In der so konstruierten graphischen Darstellung, bei der jeder Punkt die entsprechenden Glaskonstanten charakterisiert, ist es sehr einfach ein Gläserpaar zu bestimmen, das die Gleichungen (26) und (31) erfüllt oder ihrem verallgemeinerten Ausdruck - einer

gewissen Modifizierung der Gleichung (24) - genügt

(32)

In einer solchen graphischen Darstellung bildet die Linie, die zwei beliebige Punkte mit den Koordinaten $(\gamma_1; \gamma_1 V_D, 1)$ und $(\gamma_2; \gamma_2 V_D, 2)$ verbindet, mit der Abszissenachse den Winkel Θ , dessen Tangens gleich

(33)

ist.

Bei $C = 0$ und $V = -\delta^*$ sieht die Bedingung (31) folgendermaßen aus:

(33a)

Ist das Objektivgehäuse aus Stahl gefertigt ($\delta^* = 11.5 \cdot 10^{-6}$), finden wir aus der Beziehung (33a)

$$\operatorname{tg} \Theta = 1.15;$$

daraus folgt

$$\Theta \approx -49^\circ.$$

In Zeichnung 1 ist die Gerade AB gezeichnet, die mit der Abszissenachse einen Winkel von ungefähr -49° bildet und durch Punkte verläuft, deren Koordinaten den Glaskonstanten F1 ($\gamma = 36.9; \gamma V_D \cdot 10^5 = 5.2$) und TK15 ($\gamma = 60.2; \gamma V_D \cdot 10^5 = -23$) annähernd entsprechen. Offensichtlich wird jedes beliebige Punktepaar, das auf der Geraden AB oder einer ihrer Parallelen liegt, die Kombination von Gläsern bestimmen, deren Konstanten die Bedingung (33a) erfüllen.

Wenn das Objektivgehäuse aus Invar hergestellt ist

($\gamma^* = 1.6 \cdot 10^{-6}$), finden wir aus (33a)

$$\operatorname{tg} \Theta = -0.16;$$

daraus folgt

$$\Theta \approx -9^\circ.$$

Diese Bedingung wird von vielen Kombinationen von Gläserpaaren, insbesondere von der Gläserkombination BK10 und TF 5, ebenfalls erfüllt.

Den Konstanten der Gläser BK10 und TF 5 entsprechen mit hinreichender Genauigkeit die Koordinaten der auf der Geraden CD liegenden Punkte.

Ist das Objektivgehäuse aus Silumin der Sorte AL8, bei dem $\gamma^* = 24.5 \cdot 10^{-6}$, hergestellt, finden wir aus (33a)

$$\operatorname{tg} \Theta = -2.45;$$

daraus folgt

$$\Theta = -67^\circ 48'.$$

Dieser Forderung entspricht hinreichend gut insbesondere das Gläserpaar BF26 und LK6, das auf der Geraden EF liegt.

Jedes beliebige Punktepaar auf einer zu EF parallelen Gerade wird ebenfalls eine Kombination von Gläsern bestimmen, deren Konstanten die Bedingung (33a) erfüllen.

Das in Zeichnung 1 dargestellte Netz von Glaskonstanten ist auf der Basis der im neuen Glaskatalog aufgeführten Angaben konstruiert worden.

Die Werte der Temperaturzunahme des Brechungsindex β^* und der linearen Ausdehnungskoeffizienten der Gläser α^* , die für eine Berechnung der entsprechenden Größen V not-

wendig sind, wurden demselben Glaskatalog entnommen; die Größen von α^* wurden als Mittelwerte im Temperaturbereich von -60 bis $+20^{\circ}$ angenommen.

Offensichtlich nimmt man, wenn die Korrektur der monochromatischen Aberrationen des Systems nicht für die Gerade D ($\lambda = 589.3 \text{ m}\mu$), sondern für eine andere Wellenlänge (z.B. für die Gerade C oder F) durchgeführt wird, anstelle des Parameters V_D (der der Aufstellung des Nomogramms in Zeichnung 1 zugrundegelegt wurde) den entsprechenden thermooptischen Parameter V_{λ} ; die entsprechenden Glaskoeffizienten β_C^* , β_D^* und β_F^* wurden auf Empfehlung des Autors in den neuen sowjetischen Katalog optischer Gläser (GOST ¹ 3514-57) aufgenommen.

Die Durchrechnung für ein Doppelobjektiv wird etwas schwieriger, wenn der chromatische Parameter C in der Formel (32) nicht gleich Null ist. In diesem Fall muß die Aufgabe mit dem Iterationsverfahren gelöst werden. Unter Berücksichtigung, daß die Größe des chromatischen Parameters C gewöhnlich klein ist, muß in der ersten Annäherung in der Formel (32) $C = 0$ gesetzt werden und die Parameter $(\nu_1, V_{D,1})$ und $(\nu_2, V_{D,2})$, die einem bestimmten Gläserpaar entsprechen, nach dem oben angeführten Verfahren bestimmt werden. Dies wird es ermöglichen, bei vorgegebenem C den Wert des auf der rechten Seite der Formel (32) stehenden Ausdrucks zu berechnen und schon in der zweiten Annäherung die entsprechende neue (der ersten nahe) Kombination von Gläsern zu bestimmen.

Es ist ausreichend, wenn diese Annäherungen 1 - 2 mal durchgeführt werden.

Als komplizierter erweist sich die Aufgabe, ein Glied aus zwei verkitteten Linsen zu berechnen. Die Temperaturänderungen können bei einem solchen System offensichtlich von mechanischen Verformungen der brechenden Flächen

Anm. d. Übers.: GOST = Staatlicher Unionsstandard

der Linsen begleitet sein. Die Art der Krümmungsänderung der verkitteten brechenden Flächen hängt bei einem Ansteigen oder Absinken der Temperatur in erheblichem Maße von den physikalischen Eigenschaften des Kittstoffes und den elastischen Eigenschaften der optischen Mittel ab. Wenn die Verteilung der Temperaturgradienten in den Linsen axial-symmetrisch ist, werden die entstehenden mechanischen Verformungen der brechenden Flächen ebenfalls symmetrisch in Bezug auf die optische Achse sein. Diese Verformungen können prinzipiell dadurch vermieden werden, daß ein Kittstoff gewählt wird, der innerhalb des gegebenen Bereichs der Temperaturschwankung viskos und leichtflüssig bleibt.

Die bei Temperaturänderungen entstehende Differenz der Krümmungsradien der gekitteten Flächen hängt von der Differenz der Ausdehnungskoeffizienten der gekitteten Gläser ab, von der Krümmung der gekitteten brechenden Linsenflächen, dem Durchmesser der Linsen und dem Temperaturänderungsbereich.

r - soll der Radius der Kittflächen der Linsen sein,
 $2H$ - der Durchmesser der Linsen,
 $e \approx \frac{H^2}{2r}$ - die Größe des "Pfeils",
 α_1^* und α_2^* - die Ausdehnungskoeffizienten der zu kittenden optischen Mittel

Bei einem Ansteigen oder Absinken der Temperatur um die Größe Δt wird die Differenz der Änderungen der Flächenradien durch die Formel

(34)

ausgedrückt.

Dem entspricht angenähert folgende Differenz der Änderung der "Pfeile"

(35)

Daraus folgt, daß je kleiner die Größe des "Pfeils" e ist, d.h. je geringer die Krümmung der Kittflächen ist, desto mehr können sich die Werte der Ausdehnungskoeffizienten α_1^* und α_2^* der zu kittenden Gläser unterscheiden.

Wir drücken die Änderung ΔS_e in der Zahl der Interferenzringe ΔN aus;

. (36)

Wie aus der Praxis der Fertigung optischer Instrumente bekannt ist, ist beim Kitten von Flächen mit Kitt vom Typ Kanadabalsam in vielen optischen Geräten mit kleinem und mittlerem Durchmesser (bis 100 - 150 mm) ein Paßfehler der bearbeiteten brechenden Fläche in das Probeglas innerhalb des Bereichs bis zu 5 Interferenzringen zulässig. Wenn man annimmt, daß für zwei zu kittende Flächen eine Differenz von $\Delta N = 10$, die bei einer Temperaturänderung entsteht, zulässig ist, finden wir - unter der Voraussetzung $\Delta t = 100^\circ$ und $\lambda = 600 \text{ m}\mu$ - aus der Beziehung (36)

. (37)

Wenn man weiter annimmt, daß bei Linsen mittleren Durchmessers die Größe des "Pfeils" e nicht über $1/4$ - $1/5$ des Linsendurchmessers hinausgeht, finden wir aus der Gleichung (37)

. (38)

Offensichtlich muß die Anwendung von Gläsern mit einer Differenz der Ausdehnungskoeffizienten, die nicht über die Größe $1 \cdot 10^{-6}$ hinausgeht in Gliedern, die verkittet werden, als durchaus zulässig angesehen werden. Gleichzeitig ist die Erfüllung dieser Bedingung in den konkreten Berechnungen nicht besonders mühsam; von dieser

Tatsache kann man sich leicht überzeugen, wenn man die Größen der Temperaturkonstanten verschiedener Gläser miteinander vergleicht.

In Zeichnung 2 ist ein Netz gezeichnet, das die thermooptischen Konstanten verschiedener Glasarten charakterisiert. An den Koordinatenachsen sind die Werte der Parameter

$V_D = \frac{p^* D}{n_D - 1} - \alpha^*$ und α^* der optischen Gläser abgetragen.

Es zeigt sich, daß bei der Mehrzahl der optischen Gläser die Differenz der Koeffizienten nicht über die Größe $1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-6}$ hinausgeht, während die Differenz der Größen des thermooptischen Hauptparameters V_D bei verschiedenen Glassorten $4 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-6}$ erreicht. Daraus folgt, daß die Bedingung (38) in vielen Fällen der Rechenpraxis ohne besondere Mühe erfüllt werden kann.

Bei der kleinen oben aufgezeigten Differenz der Ausdehnungskoeffizienten der Gläser kann die Berechnung der thermooptischen Aberrationen eines gekitteten Glieds nach denselben Formeln (22) durchgeführt werden, da der thermooptische Einfluß der Kittschicht in diesem Fall nicht groß ist. Wie eine Analyse ergibt, ist (wenn man das Glied als dreilinsiges Element ansieht, d.h. wenn man die Kittschicht zwischen den Gläserflächen als Linse betrachtet) der bei der kleinen Differenz $\Delta \alpha^*$ einzuführende Fehler ΔV der Größe des thermooptischen Parameters des Gesamtglieds V gegenüber der Größe des Parameters V eine Größe höherer Ordnung einer kleinen Größe.

Somit wird die Berechnung eines doppelinsigen gekitteten Glieds, das durch die Hauptparameter P , W , C und V charakterisiert ist, durchgeführt wie folgt.

1. Für die vorgegebenen Größen der Parameter P und W , denen ein bestimmter Wert P_{\min} entspricht, kann man nach dem bekannten graphisch-analytischen Verfahren Kombinations-

nen optischer Gläser aufstellen, die die Möglichkeit garantieren, P_{\min} bei einem fixierten chromatischen Parameter zu erhalten.

2. Unter den möglichen Gläserpaarkombinationen wird - unter Anwendung des oben vorgeschlagenen graphischen Verfahrens - die Gläserkombination gewählt, deren Wert des Parameters V nahe dem vorgegebenen ist bei möglichst kleiner Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten des ausgewählten Gläserpaares.

Die Lösung einer solchen Aufgabe läßt sich erheblich vereinfachen, wenn für die anzuwendenden optischen Gläser vorher Berechnungstabellen für Zweilinser - ähnlich den bestehenden - aufgestellt werden, die aber als Hauptveränderliche die Parameter P_{\min} , C und V haben. Für die Aufstellung solcher Tabellen benutzte der Autor die schon bestehenden und berechnete in ihnen ergänzend für alle Kombinationen P_{\min} und C des Wertes des Parameters V . Auf der Basis dieser Tabellen wurden Nomogramme aufgestellt, die es ermöglichen, höchst einfach nach den gegebenen Werten von P_{\min} und C das Gläserpaar zu bestimmen, das von vornherein den gegebenen Wert des Parameters V hat. Das Nomogramm ist folgendermaßen aufgebaut (Zeichnung 3). An der Abszissenachse sind die Werte von V abgetragen; an der Ordinatenachse - die Werte von P_{\min} ; jedem Gläserpaar entspricht somit eine bestimmte Kurve AB , deren Punkte den verschiedenen Werten von C entsprechen. In der graphischen Abbildung sind darüber hinaus (durch eine punktierte Linie) Hilfskurven eingetragen, die Punkte gleicher Werte von C verbinden. Das Vorhandensein eines solchen Netzes vereinfacht die Aufgabe der Wahl des jeweiligen Gläserpaares, das bei der Berechnung einer gekitteten Kombination zu den erforderlichen Werten seiner wichtigsten monochromatischen, chromatischen und thermo-optischen Parameter führt.

In ausländischen Katalogen optischer Gläser und in

dem früheren sowjetischen Katalog sind der Brechungsindex des Glases n_D und die Dispersionszahl

$$\gamma = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

die grundlegenden optischen Konstanten. In dem neuen sowjetischen Katalog (GOST 3514-57) wurden auf Empfehlung des Autors die Werte der thermooptischen Konstanten der Gläser V_C und die Größen der Konstanten β_C^* , β_D^* und β_F^* aufgenommen. Dies ermöglicht eine vereinfachte Wahl der Gläser bei der Lösung von Aufgaben der Korrektur thermooptischer Aberrationen von Systemen.

L i t e r a t u r

[1] D.S. V o l o s o v. Opt. i spektr., 4, 663, 1958

Staatliches Optisches
S.I. Vavilov-Institut

Eingegangen in der Redaktion
am 28. Sept. 1957

Z e i c h n u n g 1

Nomogramm für die Berechnung von
Doppelobjektiven, die nicht gestört
werden

(I)

Z e i c h n u n g 2

Netz der thermooptischen Konstanten
der Gläser

(II)

Z e i c h n u n g 3

Schematische Darstellung des Aufbaus
eines Nomogramms für die Wahl eines
Gläserpaares eines gekitteten Objek-
tivs, das nicht gestört wird

Anmerkung des Übersetzers

Bei den Termini in < > handelt es sich um die wörtliche
Übersetzung.-

Stuttgart, den 31.10.1968

i.A.

Monika Wagenknecht

(Monika Wagenknecht)
Diplom-Übersetzerin

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ АБЕРРАЦИЙ

III. ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ СИСТЕМ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ТОНКИХ КОМПОНЕНТОВ

Д. С. Волосов

На основе построенной нами теории термооптических aberrаций [1] рассмотрен общий метод расчета перестраивающихся при изменении температуры оптических систем, состоящих из тонких компонентов. Каждый из компонентов в свою очередь может представлять сложную комбинацию из нескольких тонких линз.

1. Термооптические aberrации системы, состоящей из тонких компонентов

Коэффициенты термооптических aberrаций положения и увеличения T_I и T_{II} оптической системы, состоящей из p тонких линз, могут быть представлены [1] выражениями

$$T_I = \frac{t-20}{h_1^2} \sum_{m=1}^{m=p} h_m^2 \varphi_m \left(\frac{\beta_m^*}{n_m-1} - a_m^* \right) + \Delta T_I; \quad (1)$$

$$T_{II} = (t-20) \sum_{m=1}^{m=p} h_m J_m \varphi_m \left(\frac{\beta_m^*}{n_m-1} - a_m^* \right) + \Delta T_{II}, \quad (2)$$

где

$$\Delta T_I = \frac{1}{h_1^2} \sum_{m=2}^{m=p} a_m^2 d d_{m-1}; \quad (1a)$$

$$\Delta T_{II} = \sum_{m=2}^{m=p} a_m \beta_m^* d d_{m-1}. \quad (2a)$$

Для вычисления ΔT_I и ΔT_{II} суммирование необходимо произвести по всем $p-1$ воздушным промежуткам между p линзами. Обозначения величин, входящих в эти формулы, сохранены прежними [1].

Обобщим формулы (1) и (2) для оптической системы, состоящей из тонких компонентов.

Пусть некоторый s -й компонент системы, состоящий из k соприкасающихся тонких линз, имеет оптическую силу Φ_s . Для этого компонента формулы (1) и (2) запишутся в виде

$$T_{I,s} = (t-20) \frac{h_s^2}{h_1^2} \sum_{j=1}^{j=k} \varphi_j \left(\frac{\beta_j^*}{n_j-1} - a_j^* \right); \quad (3)$$

$$T_{II,s} = (t-20) h_s J_s \sum_{j=1}^{j=k} \varphi_j \left(\frac{\beta_j^*}{n_j-1} - a_j^* \right), \quad (3a)$$

где φ_j — оптическая сила j -й линзы s -го компонента системы, сила которого Φ_s ,

$$\Phi_s = \sum_{j=1}^{j=k} \varphi_j. \quad (4)$$

Обозначим через $\bar{\varphi}_j$ относительную силу j -й линзы, т. е. отношение оптической силы линзы φ_j к оптической силе всего компонента Φ_s ;

$$\bar{\varphi}_j = \frac{\varphi_j}{\Phi_s}. \quad (5)$$

После подстановки в (3) и (3а) получим

$$T_{I, s} = (t - 20) \frac{h_s^2}{h_1^2} \Phi_s \sum_{j=1}^{j=k'} \bar{\varphi}_j \left(\frac{\beta_j^*}{n_j - 1} - \alpha_j^* \right); \quad (6)$$

$$T_{II, s} = (t - 20) h_s J_s \Phi_s \sum_{j=1}^{j=k} \bar{\varphi}_j \left(\frac{\beta_j^*}{n_j - 1} - \alpha_j^* \right), \quad (6a)$$

где суммирование распространяется по всем k линзам s -го тонкого компонента.

Таким образом, выражение коэффициентов термооптических аберраций системы, состоящей из p тонких компонентов, разделенных $(p - 1)$ воздушным промежутком, имеет вид

$$T_I = \frac{t - 20}{h_1^2} \sum_{s=1}^{s=n} h_s^2 \Phi_s \sum_{j=1}^{j=k} \bar{\varphi}_j \left(\frac{\beta_j^*}{n_j - 1} - \alpha_j^* \right) + \Delta T_I; \quad (7)$$

$$T_{II} = (t - 20) \sum_{s=1}^{s=p} h_s J_s \Phi_s \sum_{j=1}^{j=k} \bar{\varphi}_j \left(\frac{\beta_j^*}{n_j - 1} - \alpha_j^* \right) + \Delta T_{II}. \quad (8)$$

Для обоих коэффициентов термооптических аберраций под знаками вторых сумм оказалось одно и то же выражение, относящееся к s -му компоненту,

$$V_s = \sum_{j=1}^{j=k} \bar{\varphi}_j \left(\frac{\beta_j^*}{n_j - 1} - \alpha_j^* \right). \quad (9)$$

Величину V_s назовем основным термооптическим параметром тонкого компонента.

В этом случае выражение коэффициентов термооптических аберраций системы, состоящей из p тонких компонентов, разделенных $(p - 1)$ воздушным промежутком, может быть представлено в виде

$$T_I = \frac{t - 20}{h_1^2} \sum_{s=1}^{s=p} h_s^2 \Phi_s V_s + \Delta T_I; \quad (10)$$

$$T_{II} = (t - 20) \sum_{s=1}^{s=p} h_s J_s \Phi_s V_s + \Delta T_{II}. \quad (11)$$

где

$$\Delta T_I = \frac{1}{h_1^2} \sum_{s=2}^{s=p} \alpha_s^2 d d_{s-1}; \quad (10a)$$

$$\Delta T_{II} = \sum_{s=2}^{s=p} \alpha_s \beta_s d d_{s-1}. \quad (11a)$$

Величины термооптических aberrаций системы определяются из формул [1]

$$\left. \begin{aligned} ds'_k &= \bar{a}s_1 - \frac{\bar{a}s_1^2}{n_1} T_I; \\ \frac{dL'}{L'_{20}} &= \frac{d\beta}{\beta} + \frac{\text{tg } w'}{L'_{20}} d\xi; \\ \frac{d\beta}{\beta} &= \frac{dn_1}{n_1} - \frac{dn'_k}{n'_k} + \frac{\beta}{f} ds_1 - \frac{ds'_k}{x'_k - s'_k} - \frac{1}{f} T_{II}. \end{aligned} \right\} \quad (12) \quad (13)$$

Обозначения величин сохранены прежними [1].

Если aberrация в пространстве предметов отсутствует ($ds_1 = 0$), а плоскость предмета бесконечно удалена ($s_1 = \infty$), то формулы (12) и (13) принимают вид

$$ds'_k = -f' T_{I\infty}; \quad (12a)$$

$$\frac{dL'}{L'_{20}} = -\frac{dx}{L'_{20}} \text{tg } w' + T_{II\infty}, \quad (13a)$$

при этом положено, что $n_1 = n'_k = 1$, а коэффициенты термооптических aberrаций $T_{I\infty}$ и $T_{II\infty}$ определены при следующей нормировке начальных координат вспомогательных параксиальных лучей

$$f' = 1, \quad \alpha_1 = 0, \quad h_1 = 1,$$

$$\beta_1 = 1, \quad y_1 = x_1.$$

2. Выражение коэффициентов термооптических aberrаций сложной системы через основные термооптические параметры ее компонентов

Оптическая сила тонкого компонента выражается простой зависимостью

$$\Phi_s = \frac{\alpha'_s - \alpha_s}{h_s}, \quad (14)$$

где α_1 и α'_s — углы 1-го параксиального луча с оптической осью соответственно до и после преломления луча через линзы s -го компонента.

После подстановки (14) в выражения (10) и (11) находим

$$T_I = \frac{t-20}{h_1^2} \sum_{s=1}^{s=p} h_s V_s^* + \Delta T_I; \quad (15)$$

$$T_{II} = (t-20) \sum_{s=1}^{s=p} J_s V_s^* + \Delta T_{II}, \quad (16)$$

где символом V_s^* обозначено выражение

$$V_s^* = (\alpha'_s - \alpha_s) V_s. \quad (17)$$

Для бесконечно удаленной плоскости предметов ($\alpha_s = 0$) зависимость (17) принимает вид

$$V_s^* = \alpha'_s V_s. \quad (17a)$$

Обратив внимание, что $\alpha'_s = h_s \Phi_s$, находим

$$V_s^* = h_s \Phi_s V_s. \quad (17b)$$

Как следует из (4) и (5),

$$\bar{\Phi}_s = \sum_{j=1}^{j=k} \bar{\varphi}_j = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} \varphi_j}{\Phi_s} = 1.$$

Следовательно, основной термооптический параметр V s -го компонента определяется при условии, что относительная оптическая сила компонента равна 1.

Воспользовавшись (15), (16) и (17), можно выразить коэффициенты термооптических aberrаций T_I и T_{II} системы, состоящей из p тонких компонентов, через их основные параметры V

$$T_I = \frac{t-20}{h_1^2} \sum_{s=1}^{s=p} h_s (\alpha'_s - \alpha_s) V_s + \Delta T_I; \quad (18)$$

$$T_{II} = (t-20) \sum_{s=1}^{s=p} J_s (\alpha'_s - \alpha_s) V_s + \Delta T_{II}, \quad (19)$$

где параметры V компонентов определены при условии бесконечно удаленной плоскости предметов и при нормировке $h_1 = 1$ и $f' = 1$.

3. Основной термооптический параметр простой линзы и двухлинзового компонента

Как следует из (9), основной термооптический параметр простой линзы, фокусное расстояние которой равно 1, можно представить в виде

$$V_\lambda = \frac{\beta_\lambda^*}{n_\lambda - 1} - \alpha^*. \quad (20)$$

Этот параметр, зависящий от постоянных стекла n_λ , β_λ^* и α^* , рационально принять в качестве основной характеристики термооптических свойств оптических стекол. Параметр V_λ оказывается несколько различным для лучей различных длин волн λ . У стекол различных марок величина параметра V_λ в видимой части спектра изменяется приблизительно в пределах

$$-10^{-5} < V_\lambda < +10^{-5}. \quad (20a)$$

У некоторых оптических стекол величина параметра V_λ близка к 0. Простая линза, изготовленная из подобных стекол, будет свободна от термооптических aberrаций; у этих стекол, как следует из (20),

$$\frac{\beta_\lambda^*}{n_\lambda - 1} \approx \alpha^*. \quad (21)$$

Большой интерес как теоретический, так и практический представляет простая система, состоящая из двух близко расположенных друг к другу линз.

Рассмотрим вначале задачу расчета двухлинзовой несклеенной системы. Эта задача является более простой, так как температурные изменения склеенного компонента могут привести к существенным деформациям преломляющих поверхностей линз, математический анализ которых (деформаций) оказывается чрезвычайно трудным.

Двухлинзовая несклеенная система, как известно, дает возможность корригировать 3 аберрации: сферическую, кому и хроматизм положения. Эти аберрации могут быть исправлены для любой комбинации оптических стелок типа крон—флинт.

Для заданной пары стелок и заданного фокусного расстояния системы хроматизм исправляется при определенных оптических силах линз системы. Добавочное условие устранения термооптической аберрации положения для длины волны λ , как следует из (12), приводит к системе уравнений

$$\bar{\varphi}_1 + \bar{\varphi}_2 = 1; \tag{22a}$$

$$\frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2} = -C; \tag{22б}$$

$$V_\lambda = \bar{\varphi}_1 V_{\lambda, 1} + \bar{\varphi}_2 V_{\lambda, 2} = \frac{T_I}{t - 20}, \tag{22в}$$

где V_λ — основной термооптический параметр тонкого компонента; $\bar{\varphi}_1$ и $\bar{\varphi}_2$ — оптические силы линз, приведенные к фокусному расстоянию компонента, равному 1; для однокомпонентного тонкого объектива величина ΔT_I в формуле (12) или (15) равна 0.

Из (22a) и (22б) имеем

$$\bar{\varphi}_1 = \frac{\nu_1 + \nu_1 \nu_2 C}{\nu_1 - \nu_2}; \tag{23}$$

из (22a) и (22в) находим

$$\bar{\varphi}_1 = \frac{V_\lambda - V_{\lambda, 2}}{V_{\lambda, 1} - V_{\lambda, 2}}. \tag{23a}$$

Уравнения (23) и (23a) определяют условие выбора дисперсий и термооптических параметров стелок

$$\frac{\nu_1 + \nu_1 \nu_2 C}{\nu_1 - \nu_2} = \frac{V_\lambda - V_{\lambda, 2}}{V_{\lambda, 1} - V_{\lambda, 2}}. \tag{24}$$

Так как для ахроматического объектива $C = 0$, то из (24) получим

$$\frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} = \frac{V_\lambda - V_{\lambda, 2}}{V_{\lambda, 1} - V_{\lambda, 2}}. \tag{24a}$$

Если термооптическая аберрация положения устранена ($T_I = 0$), то

$$V = \frac{T_I}{t - 20} = 0. \tag{25}$$

Условие (24a) в этом случае принимает вид

$$\nu_1 V_{\lambda, 1} = \nu_2 V_{\lambda, 2}. \tag{26}$$

Это и будет условием для выбора термооптических параметров стелок, обеспечивающих исправление термооптической аберрации для длины волны λ ахроматического двухлинзового объектива.

Следует иметь в виду, что исправление этой аберрации рационально лишь тогда, когда при температурных изменениях достигнуто постоянство расстояния объектива от плоскости приемника изображения. Последнее может быть осуществлено, в частности, применением для изготовления корпуса объектива материала, имеющего малый температурный коэффициент расширения (например, инвар), или путем применения некоторого более сложного устройства, компенсирующего изменение расстояния между объективом и приемником изображения при изменении температуры. Такое устройство, связывающее оптическую систему с приемником изображения, может

быть, в частности, осуществлено при использовании 2 или нескольких металлов или других материалов с различными коэффициентами расширения.

Если при изменении температуры происходит уменьшение или увеличение расстояния от объектива до некоторой фиксированной (неподвижной) плоскости приемника изображения, то изменение этого расстояния должно быть компенсировано введением термооптической аберрации объектива. Очевидно в этом случае $T_1 \neq 0$ и, следовательно, величина V_λ в формуле (24а) не равна 0.

Пусть расстояние a от объектива до плоскости приемника изображения изменилось на величину da в результате уменьшения или увеличения температуры от 20°C до t , т. е.

$$da = (t - 20) \gamma_a^*, \quad (27)$$

где γ^* — коэффициент линейного расширения материала корпуса.

Величина термооптической аберрации объектива для бесконечно удаленной плоскости предметов выразится формулой [1]

$$ds'_k = -f' T_1, \quad (28)$$

где f' — фокусное расстояние объектива.

Для устранения эффекта температурного смещения плоскости изображения относительно плоскости приемника, очевидно, необходимо выполнить условие [1]

$$da = ds'_k. \quad (29)$$

Воспользовавшись выражениями (27)—(29) и положив $a = f'$, находим

$$V_\lambda = -\gamma^*. \quad (30)$$

После подстановки в (24а) получим

$$\gamma^* = - \left(\frac{\nu_1 V_{\lambda, 1} - \nu_2 V_{\lambda, 2}}{\nu_1 - \nu_2} \right). \quad (31)$$

Это — условие для выбора дисперсий и термооптических постоянных стекол, обеспечивающих температурную нерасстраиваемость ахроматического двухлинзового объектива, если коэффициент расширения материала корпуса задан.

Решение такой задачи, как показано ниже, выполняется весьма просто. Вместе с тем оно не носит частного характера, поскольку к расчету двухлинзового объектива сводится большая группа задач расчета более сложных оптических систем. Предлагается следующий графо-аналитический способ решения.

По оси абсцисс прямоугольной системы координат откладываются показатели дисперсии ν_{F-C} (рис. 1) оптических стекол, по оси ординат — произведения $\nu_{F-C} V_D$ соответствующих стекол, увеличенные в 10^5 раз. Имея таким образом построенный график, каждая точка которого характеризует соответствующие константы стекла, можно весьма легко и просто определять пару стекол, удовлетворяющую уравнениям (26) и (31) или их обобщенному выражению, являющемуся некоторым видоизменением уравнения (24),

$$\frac{\nu_1 V_{\lambda, 1} - \nu_2 V_{\lambda, 2}}{\nu_1 - \nu_2} = V_\lambda - \nu_1 \nu_2 C \left(\frac{V_{\lambda, 1} - V_{\lambda, 2}}{\nu_1 - \nu_2} \right). \quad (32)$$

На таком графике линий, соединяющая две любые точки с координатами $(\nu_1; \nu_1 V_{D, 1})$ и $(\nu_2; \nu_2 V_{D, 2})$, образует с осью абсцисс угол θ , тангенс которого равен

$$\text{tg } \theta = \frac{\nu_1 V_{D, 1} - \nu_2 V_{D, 2}}{\nu_1 - \nu_2} \cdot 10^5. \quad (33)$$

При $C = 0$ и $V = -\gamma^*$, условие (31) принимает вид

$$\text{tg } \theta = -\gamma^* \cdot 10^5. \quad (33a)$$

Если корпус объектива изготовлен из стали ($\gamma^* = 11.5 \cdot 10^{-6}$), то из (33a) находим

$$\text{tg } \theta = 1.15;$$

отсюда

$$\theta \approx -49^\circ.$$

На рис. 1 проведена линия AB , образующая угол около -49° с осью абсцисс и проходящая через точки, координаты которых приблизительно соответствуют константам стекол Ф1 ($\nu = 36.9$; $\sqrt{V_D} \cdot 10^5 = 5.2$) и ТК15 ($\nu = 60.2$; $\sqrt{V_D} \cdot 10^5 = -23$). Очевидно, любая пара точек, расположенных на прямой AB или ей параллельной, определит комбинацию стекол, константы которых удовлетворяют условию (33а).

Если корпус объектива сделан из инвара ($\gamma^* = 1.6 \cdot 10^{-6}$), из (33а) находим

$$\operatorname{tg} \theta = -0.16;$$

отсюда

$$\theta \approx -9^\circ.$$

Это условие выполняется также многими комбинациями пар стекол, в частности комбинацией стекол БК10 и ТФ5;

Константам стекол БК10 и ТФ5 с достаточной точностью соответствуют координаты точек, лежащих на линии CD .

Если корпус объектива сделан из силумина марки АЛ8, имеющего $\gamma^* = 24.5 \cdot 10^{-6}$, то из (33а) находим

$$\operatorname{tg} \theta = -2.45;$$

отсюда

$$\theta = -67^\circ 48'.$$

Этому требованию достаточно хорошо отвечает, в частности, пара стекол БФ26 и ЛК6, расположенная на линии EF .

Любая пара точек, находящихся на прямой, параллельной линии EF , также определяет комбинацию стекол, константы которых удовлетворяют условию (33а).

Сетка констант стекол, представленная на рис. 1, построена на основании данных, приведенных в новом каталоге стекол.

Значения температурных приращений показателя преломления β^* и коэффициентов линейного расширения стекол α^* , необходимые для расчета соответствующих величин V , взяты из того же каталога стекол; величины α^* приняты как средние значения в интервале температур от -60 до $+20^\circ$.

Очевидно, если коррекция монохроматических aberrаций системы осуществляется не для линии D ($\lambda = 589.3$ нм), а для другой длины волны (например, для линии C или F), то вместо параметра V_D (принятого в основу построения номограммы на рис. 1) принимают соответствующий термооптический параметр V_λ ; соответствующие коэффициенты стекол β_C^* , β_D^* и β_F^* по рекомендации автора включены в новый отечественный каталог оптических стекол (ГОСТ 3514—57).

Расчет двухлинзового объектива несколько усложняется, если хроматический параметр C в формуле (32) не равен нулю. В этом случае задачу следует решать методом последовательных приближений. Обратив внимание на то, что величина хроматического параметра C обычно невелика, следует в 1-м приближении в формуле (32) положить $C=0$ и определить по методу, изложенному выше, параметры $(\nu_1, V_{D,1})$ и $(\nu_2, V_{D,2})$, соответствующие некоторой паре стекол. Это даст возможность вычислить при заданном C значение выражения, стоящего в правой части формулы (32), и определить уже в 2-м приближении и соответствующую новую (близкую к первой) комбинацию стекол.

Таких приближений достаточно выполнить не более 1—2.

Несколько более сложной оказывается задача расчета двухлинзового склеенного компонента. Температурные изменения у такой системы, очевидно, могут сопровождаться механическими деформациями преломляющих поверхностей линз. Характер изменения кривизны склеенных преломляющих поверхностей при возрастании или убывании температуры в значительной степени зависит от физических свойств склеивающего вещества и от упругих свойств оптических сред. В случае, если распределение температурных градиентов в линзах аксиально-симметричное, возникающие механические деформации преломляющих поверхностей, очевидно, будут также симметричными относительно оптической оси. Этих деформаций в принципе можно избежать, если применять склеивающее вещество, остающееся вязким и текучим в пределах заданного интервала колебания температуры.

Возникающая при температурных изменениях разность радиусов кривизны склеенных поверхностей зависит от разности коэффициентов расширения склеиваемых стекол, от кривизны склеиваемых преломляющих поверхностей линз, диаметра линз и интервала изменения температуры.

Пусть r — радиус склеиваемых поверхностей линз, $2H$ — диаметр линз, $e \approx \frac{H^2}{2r}$ — величина «стрелки», α_1^* и α_2^* — коэффициенты расширения склеиваемых оптических сред.

При возрастании или убывании температуры на величину Δt разность изменений радиусов поверхностей выразится формулой

$$\Delta br = r(\alpha_2^* - \alpha_1^*) \Delta t. \quad (34)$$

Этому приближенно соответствует следующая разность изменения «стрелок»

$$\Delta be = e(\alpha_2^* - \alpha_1^*) \Delta t. \quad (35)$$

Отсюда видно, что чем меньше величина «стрелки» e , т. е. чем меньше кривизна склеиваемых поверхностей, тем больше могут отличаться друг от друга значения коэффициентов расширения α_1^* и α_2^* склеиваемых стекол.

Выразим изменение Δbe в числе интерференционных колец ΔN ;

$$\Delta N = \frac{\Delta be}{\lambda/2} = \frac{2e(\alpha_2^* - \alpha_1^*)}{\lambda} \Delta t. \quad (36)$$

Как известно из практики оптического приборостроения при склейке поверхностей клеем типа канадского бальзама во многих оптических приборах малого и среднего диаметра (до 100—150 мм) допустима погрешность подгонки обработанной преломляющей поверхности линзы под пробное стекло в пределах до 5 интерференционных колец. Если принять, что для двух склеиваемых поверхностей допустима разность $\Delta N = 10$, возникающая при изменении температуры, то, положив $\Delta t = 100^\circ$ и $\lambda = 600$ м μ , из (36) находим

$$\alpha_2^* - \alpha_1^* = \frac{\lambda \Delta N}{2e \Delta t} = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{e}. \quad (37)$$

Если далее принять, что у линз среднего диаметра величина «стрелки» e не превышает $1/4$ — $1/5$ от диаметра линзы, то из (37) находим

$$\alpha_2^* - \alpha_1^* = 1 \cdot 10^{-6}. \quad (38)$$

По-видимому, применение в склеиваемых компонентах стекол, имеющих разность коэффициентов расширения, не превышающую величины $1 \cdot 10^{-6}$, следует признать вполне допустимым. Вместе с тем выполнение этого условия в конкретных расчетах особого труда не представляет, в чем нетрудно убедиться, сопоставив величины температурных констант различных стекол.

На рис. 2 приведена сетка, характеризующая термооптические константы различных марок стекол. По осям координат отложены значения параметров $V_D = \frac{\beta_D}{n_D - 1} - \alpha^*$ и α^* оптических стекол. Видно,

что у большинства оптических стекол различие в коэффициентах α^* не превышает величины $1 \cdot 10^{-6}$ — $2 \cdot 10^{-6}$, в то время как различие в величинах основного термооптического параметра V_D у разных марок стекол достигает $4 \cdot 10^{-6}$ — $6 \cdot 10^{-6}$. Отсюда следует, что условие (38) во многих случаях вычислительной практики без особого труда может быть выполнено.

При малой разности коэффициентов расширения стекол, названной выше, расчет термооптических aberrаций склеенного компонента может производиться по тем же формулам (22), так как термооптическое влияние склеивающего слоя в этом случае невелико. Как показывает анализ, вносимая при малой разности $\Delta \alpha^*$ погрешность ΔV величины основного термооптического параметра всего компонента V (если рассматривать компонент как трехлинзовый, т. е. склеивающую прослойку между поверхностями стекол считать линзой) оказывается величиной высшего порядка малости по отношению к величине параметра V .

Таким образом, расчет двухлинзового склеенного компонента, характеризуемого основными параметрами P , W , C и V , выполняется в следующей последовательности.

1. Для заданных величин параметров P и W , которым соответствует определенное значение P_{min} , общеизвестным графоаналитическим приемом устанавливают комбинации оптических стекол, обеспечивающие возможность получения P_{min} при фиксированном хроматическом параметре C .

2. Среди возможных комбинаций пар стекол, используя предложенный выше графический прием, производят выбор комбинации стекол, имеющей значение параметра V , близкое к заданному, при возможно меньшей разности температурных коэффициентов расширения выбранной пары стекол.

Решение такой задачи существенно упрощается, если для применяемых оптических стекол заблаговременно сделаны таблицы расчета двухлинзовых объективов, подобные существующим, но содержащие в качестве основных переменных параметры P_{min} , C и V . Для составления таких таблиц автор воспользовался уже существующими, дополнительно вычислив в них для всех комбинаций P_{min} и C значения параметра V . На основе этих таблиц составлены номограммы, позволяющие весьма просто по заданным параметрам P_{min} и C определить пару стекол, имеющих наперед заданное значение параметра V . Номограмма построена следующим образом (рис. 3). По оси абсцисс отложены значения V ; по оси ординат — значения P_{min} ; таким образом, каждой паре стекол соответствует некоторая кривая АВ, точки которой соответствуют разным значениям C . На графике, кроме того, нанесены (пунктиром) вспомогательные кривые, соединяющие точки равных значений C . Наличие подобной сетки весьма упрощает задачу выбора соответствующей пары стекол, приводящих при расчете склеенной комбинации к требуемым значениям ее основных монохроматических, хроматических и термооптических параметров.

В иностранных каталогах оптических стекол и в ранее существовавшем отечественном каталоге основными оптическими постоянными являются показатель преломления стекла n_D и показатель дисперсии $\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$. В новом отечественном каталоге (ГОСТ 3514—57) по рекомендации автора введены значения термооптических постоянных стекол V_C и величины констант β_C^* , β_D^* и β_F^* . Это позволит упростить выбор стекол при решении задач исправления термооптических аберраций систем.

Литература

- [1] Д. С. Волосов. Опт. и спектр., 4, 663, 1958.

Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова

Поступило в Редакцию
28 сентября 1957 г.

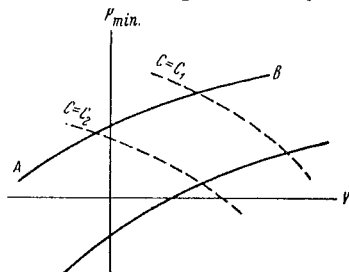


Рис. 3. Схема построения номограммы для выбора пары стекол нерасстраивающегося склеенного объектива.