ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени С. И. ВАВИЛОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

ШПЯКИН М. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОБЪЕКТИВОВ С ШИРОКИМИ ИНТЕРВАЛАМИ ИЗМЕНЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

(01.044 оптика)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ленинград
1971

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени С. И. ВАВИЛОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

ШПЯКИН М. Г.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ОБЪЕКТИВОВ С ШИРОКИМИ ИНТЕРВАЛАМИ ИЗМЕНЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

(01.044 оптика)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ленинград
1971

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АВТОРЕФЕРАТЕ

Γ — угловое увеличение афокальной насадки,

D — длина объектива от первой поверхности до плоскости изображения,

$D_{н}$ — длина афокальной насадки,

$m = \frac{\Gamma_{max}}{\Gamma_{min}} = \frac{f'_{max}}{f'_{min}}$ — кратность системы,

$C_{н}$ — отношение диаметра входного зрачка насадки при Γ_{max} к ее длине,

$C^{*}_{н}$ — наибольшее значение $C_{н}$ для систем определенной группы,

$\varphi^{(1)}, \ldots, \varphi^{(i)}$ — оптические силы складываемых систем (насадок),

φ_{Σ} — оптическая сила суммарной системы,

$\varphi_1; \varphi_2, \ldots \varphi_n$ — оптические силы компонентов системы,

$f'_1; f'_2, \ldots f'_n$ — фокусные расстояния отдельных компонентов,

$K_1; K_2$ — величины, характеризующие кинематику четырехкомпонентной системы,

δ — независимый параметр, численно равный перемещению одного из компонентов системы,

δ_2 — значение δ, при котором четырехкомпонентная система афокальна (помимо крайних точек $\delta = 0$; $\delta = \delta_{max}$),

$\bar{\delta}_j$ — значения («средние» точки), при которых должна быть афокальна суммарная система,

$d^{I}_1, \ldots, d^{I}_{n-1};\ d^{II}_1, \ldots d^{II}_{n-1}$ — расстояния между «тонкими» компонентами системы соответственно в первом и втором крайних положениях,

$S^{н}_{I,\,II,\,III,\,IV,\,V}$ — суммы Зейделя насадки.

В настоящее время объективы с переменным фокусным расстоянием нашли широкое применение, особенно в любительской и профессиональной кинематографии и телевидении. Одно из направлений в их развитии — это создание объективов все большей кратности, способных заменить широкий набор сменных объективов от широкоугольного до длиннофокусного. Необходимость получения малых габаритов системы и высокого качества изображения при ее большой кратности делает расчет объектива весьма трудной задачей. В диссертации рассмотрены вопросы теории и приемов расчета таких систем с десяти-двадцатикратным перепадом. Особое внимание при рассмотрении задачи как в параксиальной области, так и при аберрационных исследованиях было обращено на выработку методов и приемов расчета, наиболее приемлемых для практического использования и обеспечивающих получение не только требуемых оптических характеристик и качества изображения системы, но и одновременно ее минимально возможных габаритов — важных эксплуатационных характеристик панкратических систем. Эффективность предлагаемых приемов и способов расчета иллюстрируется численными примерами и результатами расчета ряда конкретных объективов, приведенных в приложении к диссертации.

Прежде всего в диссертации сделана попытка дать более или менее полный обзор публикаций за период примерно с 1958 по 1970 г., касающихся вопросов расчета систем с переменными оптическими характеристиками, а также относящихся к ним патентных материалов. Сведения обзорного характера сосредоточены в основном в общей части; вопросы аберрационного расчета объективов рассмотрены в главе 3. Большинство работ посвящено методам расчета в области гауссовой оптики систем с наиболее простыми кинематическими схемами, имеющих оптическую или линейную компенсацию сдвига плоскости изображения.

Для нашей задачи — расчета объектива большой кратности при линейном перемещении его компонентов — требуется большое число точек полной компенсации и подвижных компонентов. Ни один из предложенных методов неприемлем для практического решения такой задачи. В одних из них

(метод Бергстейна) задача сводится к решению системы нелинейных («вариофокальных») уравнений, показатель степени которых возрастает с увеличением числа компонентов в системе, и решение такой системы крайне затрудняется. В других (метод Пэка и Пегиса) не контролируется в процессе расчета одна из важнейших характеристик — длина системы и ее кинематика. Это приводит к усложнению механической конструкции объектива. Кроме того, из-за отсутствия контроля кинематики в ходе расчета отдельные компоненты могут занять неблагоприятное положение, и нет возможности выбора системы с требуемыми коррекционными возможностями. Предложенный в диссертации (глава 1) метод расчета многокомпонентных объективов путем синтеза их из более простых составляющих систем устраняет упомянутые выше недостатки и более удобен для практического использования.

Поскольку одной из целей работы являлся непосредственный расчет ряда объективов большой кратности, целесообразно было предварительно изучить различные системы с наиболее высокими характеристиками и попытаться выявить те особенности и свойства их схем, благодаря которым в них достигнуты высокие оптические параметры при относительно малых длинах.

Проведенный анализ показал, что их оптическим схемам присущ ряд общих свойств:

1. Все они четырехкомпонентные системы с механической компенсацией. Кинематика их наиболее простая из возможных для этого типа систем: первый и четвертый компоненты неподвижные, второй перемещается по винтовой направляющей, третий — по кулачковой, причем его перемещения в 3—4 раза меньше, чем перемещения второго компонента.

2. Все объективы имеют положительный первый и сильно отрицательный, превосходящий его по абсолютной величине оптической силы в 3—5 раз второй компонент.

При f'_{min} и соответственно большом угле поля зрения второй компонент подходит вплотную к первому, в результате образуется отрицательный суммарный компонент, как в схемах широкоугольных объективов (перевернутые телеобъективы), что дает возможность исправлять полевые аберрации (дисторсию, астигматизм) при довольно больших углах поля зрения $2\beta = 55—60°$.

При большом же фокусном расстоянии во всех схемах второй компонент так же, как и третий, отстоит на значительном расстоянии от первого. Благодаря этому уменьшаются высоты (h_2, h_3) лучей осевого пучка и относительные отверстия, с которыми они работают, что дает возможность получить высокую светосилу и степень коррекции аберраций при малой длине системы. Компоненты образуют в этом положении схему, характерную для телеобъективов.

Приведенные соотношения между оптическими силами первого и второго компонентов φ_1 и φ_2 и их взаимное расположение обеспечивают возможность одновременного получения в системе большого углового поля зрения, светосилы и ее относительно малой длины. Этим соотношениям должны удовлетворять и оптические схемы вновь разрабатываемых объективов.

В общей части диссертации показано, что объективы с неподвижным последним компонентом всегда можно преобразовать в систему «афокальная насадка—объектив». Причем произведение минимального и максимального увеличений насадки, как правило, близко к единице, т. е. $\Gamma_{min}\Gamma_{max} \approx 1$.

Для длины D такой системы справедливо приближенное выражение

$$D = D_н + 1{,}2\,\frac{f'_{max}}{\sqrt{m}},$$

откуда следует, что при заданных характеристиках (m, f'_{max}) длина всей системы зависит от длины насадки $D_н$. Поэтому при одинаковых оптических характеристиках и качестве изображения именно длина насадки (вариатора) определяет удачность той или иной схемы. Системы с разными характеристиками (f'_{max}, ε), но одной кратности всегда могут быть преобразованы к одинаковым путем изменения по подобию насадки (коэффициент подобия — отношение входных зрачков при f'_{max} сравниваемых объективов) и стоящего за насадкой объектива, и для их сравнения применимо соотношение

$$C_н = \frac{f'_{max}\,\varepsilon}{D_н};$$

с использованием выражения для длины системы оно может быть записано в виде

$$C_н = \frac{f'_{max}\,\varepsilon}{D - 1{,}2\,\dfrac{f'_{max}}{\sqrt{m}}}.$$

Чем более высокие характеристики (f'_{max}, ε) достигнуты в системе и чем меньше ее длина ($D_н$), тем лучше система и больше $C_н$. Вычисление величин $C_н$ для большого числа систем показало, что хорошо зарекомендовавшие себя системы («Анженье», «Канон», «Варотал») являются наилучшими и по величинам $C_н$; при этом для систем с большой кратностью $m = 8 - 10^{x}$; $C^*_н = 0{,}4$. Для облегчения сравнения системы были разбиты на группы по кратности и требованиям к качеству изображения. Предложенные соотношения для $C_н$ позволяют:

а) сравнивать различные системы и оценивать их оптические схемы,

б) руководствоваться в первом приближении в вопросе выбора и оптических характеристик вновь разрабатываемых объективов.

Приближенно по $C^*_н$ данной группы и заданным оптическим характеристикам можно определять минимально возможную длину системы из выражения

$$D = \frac{f'_{max}\,\varepsilon}{C^*_н} + 1{,}2\,\frac{f'_{max}}{\sqrt{m}}.$$

Если одновременно задается и длина системы, то после вычисления $C_н$ возможны два случая: при $C_н < C^*_н$ расчет системы затруднений не вызовет, при $C_н > C^*_н$ возможен расчет системы, как правило, только пониженного качества изображения.

Первая часть диссертации посвящена исследованиям в гауссовой области объективов большой кратности. В ее первой главе рассмотрены системы с линейно перемещающимися компонентами. Показано, что n-компонентная система в параксиальной области определяется $3n$-2 — параметры, из них n — оптические силы компонентов и $2n$-2 — параметры, определяющие ее кинематику. Для упрощения расчета и обеспечения в процессе его возможности выбора схем с оптимальными условиями работы компонентов (малые апертуры и поля зрения) рекомендуется использовать в качестве переменных только оптические силы компонентов, задавая заранее кинематику. Сформулированы условия (кратность, число точек полной компенсации, требования к габаритам: длине, заднему отрезку), которым должны удовлетворять различные типы системы. Показано, что при одинаковом числе компонентов наибольшими преимуществами обладают системы с неподвижным последним компонентом, позволяющие, помимо заданной кратности и максимального числа точек полной компенсации, получить еще и требуемую длину системы.

Основное содержание главы составляет изложение метода расчета многокомпонентных систем путем синтеза их из простых составляющих насадок, при котором задача сводится к решению линейной системы уравнений и нескольких уравнений второй степени для определения оптических сил в каждой из складываемых систем.

Для оптической силы $\varphi_{\substack{2\\ \Sigma\\ 1}}$ суммарной системы, состоящей из двух систем с оптическими силами $\varphi^{(1)}$ и $\varphi^{(2)}$, установленных таким образом, что «тонкие» — последний компонент первой системы $\varphi^{(1)}_{z_1}$ и первый компонент второй $\varphi^{(2)}_1$ соприкасаются, — выведено соотношение

$$\varphi_{\substack{2\\ \Sigma\\ 1}} = \varphi^{(1)} \overleftarrow{h}_1^{(2)} + \varphi^{(2)} \overrightarrow{h}_{z_1}^{(1)},$$

где $\overleftarrow{h}_1^{(2)}$ — высота параксиального луча на первом компоненте второй системы, рассчитанного в обратном ходе при условии

$$\overleftarrow{\alpha} = 0,\ h = 1.$$

$\overrightarrow{h}_{z_1}^{(1)}$ — высота параксиального луча на последнем z_1-м компоненте первой системы, рассчитанного в прямом ходе при условии

$$\overrightarrow{\alpha}_1 = 0,\ h_1 = 1.$$

Для случая сложения k систем, имеющих соответственно число компонентов $z_1, z_2, \ldots z_k$, формула принимает вид

$$\varphi_{\substack{k\\ \Sigma\\ 1}} = \sum_{i=1}^{i=k} \varphi^{(i)} \overleftarrow{h}_1^{(i+1)} \ldots \overleftarrow{h}_1^{(k)} h_{z_1 + \ldots + z_{i-1}},$$

где $\overleftarrow{h}_1^{(i+1)}$ — высота параксиального луча на первом компоненте системы с номером $(i+1)$, рассчитанного через нее при условиях $\overleftarrow{\alpha} = 0$, $h = 1$.

$h_{z_1 + \ldots + z_{i-1}}$ — высота параксиального луча на последнем компоненте системы, составленной из $(i-1)$ насадок, рассчитанного при условиях

$$\overrightarrow{\alpha}_1 = 0,\ h_1 = 1.$$

Наиболее удобно использовать в качестве составляющих четырехкомпонентные насадки, афокальные при крайних увеличениях. Для оптической силы такой системы справедливо выражение

$$\varphi = \frac{\delta_2}{2}\delta - \frac{(1+2\delta_2)}{2}\delta^2 + \delta^3,$$

где δ — переменный параметр, определяющий положение компонентов в системе; крайним увеличениям соответствуют $\delta = 0$ и $\delta = 0{,}5$,

δ_2 — его значение, при котором $\varphi = 0$ («средняя» точка афокальности).

При сложении двух четырехкомпонентных насадок условие равенства нулю оптической силы суммарной системы при заданных значениях параметра $\bar{\delta}_j$ $(j = 1, 2, 3, \ldots, n)$ можно записать в виде

$$\left[\frac{\delta_2^{(1)}}{2}\bar{\delta}_j - \frac{\left(1+2\delta_2^{(1)}\right)}{2}\bar{\delta}_j^2 + \bar{\delta}_j^3\right]\overleftarrow{h}_{1_j}^{(2)} + \bar{Z}\left[\frac{\delta_2^{(2)}}{2}\bar{\delta}_j - \frac{\left(1+2\delta_2^{(2)}\right)}{2}\bar{\delta}_j^2 + \bar{\delta}_j^3\right]\overrightarrow{h}_{4_j}^{(1)} = 0,$$

где $\delta_2^{(1)}$ и $\delta_2^{(2)}$ — значения параметра δ, соответствующие средним точкам афокальности соответственно первой и второй насадок; индексы j в высотах означают, что последние вычислены при соответствующих значениях параметра $\bar{\delta}_j$;

$$\bar{Z} = \frac{M_3^{(2)}}{M_3^{(1)}} = \frac{\varphi_1^{(2)}\varphi_2^{(2)}\varphi_3^{(2)}\varphi_4^{(2)}\left(1+K_1^{(2)}+K_2^{(2)}\right)}{\varphi_1^{(1)}\varphi_2^{(1)}\varphi_3^{(1)}\varphi_4^{(1)}\left(1+K_1^{(1)}+K_2^{(1)}\right)}.$$

Здесь величины K_1 и K_2 характеризуют кинематику системы и задаются конструктором.

Написанное уравнение линейное относительно трех неизвестных $\delta_2^{(1)}$, $\delta_2^{(2)}$ и $\bar{Z}$, следовательно, максимальное значение $j = 3$. В суммарной системе, кроме крайних увеличений, афокальности можно добиться еще в трех точках, число же компонентов системы $z = 7$. Уменьшить их число до $z = 6$ можно, выполнив условие

$$\varphi_{z_1}^{(1)} = -\varphi_1^{(2)}.$$

В общем случае при сложении двух четырехкомпонентных насадок необходимо выполнить следующие девять условий:

Заданной кратности m (первое условие),

$$\left.\begin{aligned}\varphi^{(1)} = 0 \text{ при } \delta = \delta_1 = 0;\ \delta = \delta_2^{(1)};\ \delta_3 = \delta_{\max}\\ \varphi^{(2)} = 0 \text{ при } \delta = \delta_1 = 0;\ \delta = \delta_2^{(2)};\ \delta_3 = \delta_{\max}\end{aligned}\right\}\ \text{(второе — седьмое условия)},$$

$$\bar{Z} = \frac{M_3^{(2)}}{M_3^{(1)}}\ \text{(восьмое условие)},$$

$\varphi_4^{(1)} = -\varphi_1^{(2)}$ (девятое условие).

Девятью параметрами, значения которых определяются из аналитических зависимостей, обеспечивающих выполнение перечисленных условий, являются оптические силы $\varphi_1^{(1)}, \ldots,$ $\varphi_4^{(1)}, \varphi_1^{(2)}, \ldots, \varphi_4^{(2)}$ компонентов и величина $p = \dfrac{\overline{D}_{\text{II}}^{(1)}}{\overline{D}_{\text{II}}^{(2)}}$, где $\overline{D}_{\text{II}}^{(1)}$ и $\overline{D}_{\text{II}}^{(2)}$ — длины составляющих насадок при $\delta = 0$.

Предложен следующий порядок решения задачи методом последовательных приближений:

1. Исходя из требуемого m, выбираются m_1 и m_2, причем $m = m_1 m_2$.

2. По известным формулам ведется расчет составляющих насадок заданной кинематики (K_1 и K_2 — задаются), имеющих кратности m_1 и m_2 и афокальных при $\delta = 0$; $\delta_2 = \alpha\delta_{\max}$; $\delta_3 = \delta_{\max}$.

В диссертации показано, что в системах исходного шага «средние» точки афокальности должны удовлетворять условию

$$\alpha^{(1)} > 1;\ \alpha^{(2)} < 0 \text{ при } M_3^{(1)} \text{ и } M_3^{(2)} \text{ одного знака, или}$$
$$\alpha^{(1)} > 1;\ \alpha^{(2)} > 1 \text{ при } M_3^{(1)} \text{ и } M_3^{(2)} \text{ разных знаков.}$$

3. Задаются значения $\overline{\delta}_2$, $\overline{\delta}_3$ и $\overline{\delta}_4$, при которых должна быть афокальна суммарная система. Путем расчета лучей через составляющие при этих значениях δ_j ($j = 2, 3, 4$) определяют $\overleftarrow{h}_{1j}^{(2)}$ и $\overrightarrow{h}_{4j}^{(1)}$.

4. Из решения системы линейных уравнений находятся $\alpha^{(1)}$, $\alpha^{(2)}$ и $\overline{Z}$.

5. Выполняется расчет насадок с вновь определенными значениями $\alpha^{(1)}$ и $\alpha^{(2)}$, вычисляются коэффициенты $M_3^{(1)}$ и $M_3^{'(2)}$, их отношение $z' = \dfrac{M_3^{'(2)}}{M_3^{(1)}}$ и величина $p = \dfrac{\overline{Z} M_3^{(1)}}{M_3^{'(2)}}$ необходимого изменения по подобию второй насадки.

6. Изменяют в p раз по подобию вторую насадку и, складывая ее с первой, определенной в п. 5, получают суммарную семикомпонентную систему.

7. Интерполируя по m_1 и сохраняя величину m неизменной, добиваются приближенного выполнения условия $\varphi_4^{(1)} = -\varphi_1^{(2)}$, повторяя при каждом новом значении m_1 вычисления по пп. 5 и 6.

8. Для точного выполнения условия $\varphi_4^{(1)} = -\varphi_1^{(2)}$ изменяют оптическую силу $\varphi_1^{(2)}$ (или $\varphi_4^{(1)}$) на необходимую величину и отодвигают соответствующий компонент на величину изменения его фокусного расстояния, сохраняя неизменным положение его задней (или передней) фокальной точки. В результате получают шестикомпонентную систему с пятью точками полной компенсации.

В диссертации в качестве иллюстрации предлагаемой методики дан пример расчета такого объектива, имеющего на всем более чем десятикратном перепаде фокусных расстояний $f' = 13{,}4 - 150$ *мм* малый сдвиг плоскости изображения $\Delta S_0' \leqslant 0{,}015$ *мм*.

Во второй главе диссертации исследуются представляющие наибольший интерес для практики системы с механической компенсацией сдвига плоскости изображения. Их параксиальные элементы предлагается определять, исходя из следующих заданных величин: минимального $f'_{\min}$ и максимального $f'_{\max}$ фокусных расстояний, равенства длины системы в крайних положениях (рассматриваются наиболее распространенные системы с неподвижными первым и последним компонентами), заданной длины D системы в одном из крайних положений и постоянства ее ($D = \text{const}$) на всем интервале изменения увеличений (условие «внутренней» механической компенсации). Для пятикомпонентных систем выведены аналитические зависимости, выражающие эти условия. В результате их решения получены формулы для определения оптических сил компонентов φ_1; φ_2; φ_3; φ_4 по заданным величинам $\Gamma_{\min}, \Gamma_{\max}$ (рассматривается случай системы насадка—объектив), выбранной величине φ_5 и заданной кинематике — положению компонентов системы при крайних увеличениях. Формулы имеют вид:

$$\varphi_1 = \frac{1}{d_1^{\text{II}}}\left[1 - \frac{1}{\Gamma_2}\left(1 - d_4^{\text{II}}\varphi_5\right)\right],$$

$$\varphi_2 = A + B\varphi_4;\ \varphi_3 = C + D\varphi_4,$$

$$d_2^{\text{I}} BD\varphi_4^2 + \left[-\frac{1}{\Gamma_1} + 1 + d_2^{\text{I}}(BC + D\varphi_1 + AD)\right] +$$
$$+ \left[-\frac{\varphi_5}{\Gamma_1} - \varphi_1 - P + d_2^{\text{I}} C(\varphi_1 + A)\right] = 0,$$

где

$$C = P - A,\ D = -(1 + B),\ P = \left(\varphi_1 + \frac{\varphi_5}{\Gamma_2}\right)\frac{1}{\varphi_1 d_1^{\text{II}} - 1},$$

$$A = \frac{\Gamma_1 - \Gamma_1 d_2^I \varphi_1 - 1 + d_3^I \varphi_5}{\Gamma_1 d_2^I}, \quad B = \frac{d_3^I}{\Gamma_1 d_2^I}.$$

При этом $d_1^I = d_4^I = d_2^{II} = d_3^{II} = 0$ и $d_2^I = d_1^{II}$; $d_3^I = d_4^{II}$ задаются. Для определения оптических сил четырехкомпонентных насадок можно использовать те же формулы, что и для систем с линейной компенсацией.

В обоих случаях оптические силы компонентов определяются в предположении их линейных перемещений. Для выполнения в системе условия внутренней механической компенсации необходимо, чтобы между найденными из формул оптическими силами компонентов существовали определенные соотношения. Для четырехкомпонентных систем показано, что «средняя» точка компенсации δ_2 должна лежать внутри интервала δ: $0 < \delta_2 < \delta_{max}$ или $0 < \alpha < 1$, где $\alpha = \frac{\delta_2}{\delta_{max}}$, если в крайних положениях увеличение $|\beta_3| \leqslant 1$; именно на третий компонент вводится нелинейное перемещение.

В случае если $|\beta_3|_{min} < 1$, и $|\beta_3|_{max} > 1$, «средняя» точка должна находиться вне интервала изменения δ

$$\delta_2 > \delta_{max} \text{ или } \alpha > 1.$$

Выбором φ_4 добиваются соответствующего значения δ_2.

Для наиболее распространенных четырехкомпонентных систем выведено общее аналитическое выражение, определяющее профиль нелинейной направляющей третьего компонента. Профиль кулачка определяется функцией $t(\delta)$, где δ и t перемещения второго и третьего компонентов относительно своего положения при минимальном фокусном расстоянии. Отрезки x_2 и x_3' соответственно второго и третьего компонентов линейно связаны с величинами t и δ. Поэтому профиль кулачка определен, если известна зависимость $x_3'(x_2)$. Для последней выведено следующее выражение:

$$x_3' = Z - \sqrt{Z^2 - f_3'^2},$$

где

$$Z = \frac{T}{2} + \frac{x_2}{2} + \frac{f_2'^2}{2x_2} - f_3' - f_2'.$$

В общей части диссертации отмечается, что интерес представляют системы с отрицательным вторым компонентом. В приведенной формуле при $x_2 > 0$ следует брать перед корнем «минус», при $x_2 < 0$ «плюс». При этом кулачок имеет U-образный профиль, если в процессе своего движения второй компонент проходит через точку, где $x_2 = f_2(\beta_2 = -1)$.

В частном случае для систем с $\varphi_3 > 0$ и расстоянием T между предметом и изображением для движущихся компонентов, равным $T = 4f_2' + 4f_3'$, третий компонент не имеет возвратного движения; в формуле при $0 < x_2 < -f_2$ следует брать «плюс», при $x_2 > -f_2$ —, по-прежнему, «минус». Этот случай особенно выгоден для получения систем большой кратности, так как β_2 и β_3 на всем интервале одновременно увеличиваются или уменьшаются, т. е. $\frac{d\beta_2}{d\delta} \cdot \frac{d\beta_3}{d\delta} > 0$. Найдено, что для получения систем с внутренней компенсацией параксиальные элементы их должны удовлетворять следующим условиям:

$$\text{при } f_3' > 0, \ f_3' > |f_2'|, \ T \geqslant 4f_2' + 4f_2',$$
$$\text{при } f_3' < 0, \ f_3' < f_2', \ 0 > T > 4f_2',$$
$$\text{где } T = \overline{D}_{II} - f_1' - f_4'.$$

Одновременно, как указано в общей части диссертации, должны соблюдаться условия.

$$\varphi_1 > 0; \ \varphi_2 < 0; \ |\varphi_2| \geqslant |\varphi_1| \text{ и } (d_{1-2})_{f'_{max}} \geqslant 0{,}7\, D_{II}.$$

В заключении первой части диссертации предлагается способ выбора из множества решений в гауссовой области системы с минимальными габаритами и наибольшими коррекционными возможностями. Для этого необходимо при f'_{max} рассчитать параксиальный луч с исходными данными: $\alpha_1 = 0$, $h_1 = \frac{1}{2}[f'_{max}\,\varepsilon]$ (ε — светосила системы). Через первые компоненты при f'_{max} идут широкие пучки лучей под небольшими углами. Высоты h_i этого луча и величины $h_i\varphi_i$, пропорциональные относительным отверстиям отдельных компонентов, во многом определяют как габариты, так и коррекционные возможности и сложность конструкций отдельных компонентов системы.

При f'_{min} через компоненты идут узкие пучки лучей под большими углами поля зрения; диаметры компонентов и их коррекционные возможности определяются высотами y_i и величинами $y_i\varphi_i$ луча, рассчитанного через насадку в обратном ходе с начальными данными $\overleftarrow{S}_1 = 0$; $\overleftarrow{\beta}_1 = \frac{y'}{f'_{об}} = \frac{y'\,\Gamma_{min}}{f'_{min}}$;

$2y'$ — линейное поле изображения.

При выборе систем необходимо стремиться к минимальным значениям h_i, y_i, $h_i\varphi_i$, $y_i\varphi_i$. В диссертации приведены результаты численных исследований и выбора оптимальных вариантов четырех- и пятикомпонентных схем объективов по предложенному способу. Эти результаты позволили сделать следующие выводы:

1. Системы с отрицательным первым компонентом обладают бо́льшими габаритами (y_1, h_2) и значениями $y_1\varphi_1$; $h_2\varphi_2$, а следовательно, меньшими коррекционными возможностями при той же длине объектива, чем системы с $\varphi_1 > 0$.

2. Для уменьшения величин $h_i\varphi_i$ в системах с $\varphi_1 > 0$ при f'_{max} сильно отрицательный второй компонент должен находиться на значительном расстоянии от первого: $(d_{1-2})_{f'_{max}} \geqslant \geqslant (0{,}7 \div 0{,}8)\,\overline{D}_н$. Малые величины $h_i\varphi_i$ позволяют получить высокую степень коррекции аберраций системы с заданными характеристиками и длиной или уменьшить по подобию длину насадки, а значит, и всей системы.

Сформулированным положениям отвечают и существующие системы, рассмотренные в общей части диссертации, анализ которых также выполнялся с помощью предложенного метода.

Разработке приемов расчета и аберрационным исследованиям объективов большой кратности посвящена вторая часть диссертации. В главе 3 дан анализ работ последних лет, касающихся вопросов коррекции систем с компонентами конечной толщины, который показывает, что и в них (во всех приводимых примерах) задача фактически сводится к использованию известного метода основных параметров тонких компонентов. В этих работах выведена в общем виде система линейных уравнений, неизвестными которой являются коэффициенты отдельных толстых компонентов. При ее решении, исходя из заданных аберраций всей системы, могут быть определены требуемые значения коэффициентов толстых компонентов. Далее встает задача расчета такого компонента с шестью определенными значениями его коэффициентов. Так как в панкратических объективах толщина компонентов выбирается технологически минимально возможной и, как правило, не используется в качестве коррекционного параметра, расчет такого компонента вызывает значительные трудности и не всегда возможен. Поэтому при численных исследованиях задачу в первом приближении приходится сводить к расчету системы из тонких компонентов.

Коррекцию системы в области аберраций Зейделя предлагается выполнять в два этапа:

а) определение основных параметров вариатора (насадки), исходя из условий стабилизации аберраций при нескольких фокусных расстояниях,

б) расчет корректора, исходя из условия исправления аберраций в целом во всей системе.

Выведены формулы, связывающие коэффициенты аберраций вариатора $S^в_j$, корректора $S^к_j$ и всей системы S_j;

$$S_{I} = \beta^3_к S^в_{I} + \overline{f}'_к S^к_{I};\quad S_{III} = \beta_к S^в_{III} + \overline{f}'_к \gamma^2_{зр} S^к_{III};\quad S_{V} = S^в_{V} + f'_к \gamma^3_{ср} S^к_{V}$$

$$S_{II} = \beta^2_к S^в_{II} + \overline{f}_к \gamma_{зр} S^к_{II};\quad S_{IV} = \beta_к S^в_{IV} + \frac{1}{\overline{f}'_к} S^к_{IV};$$

где $\beta_к$ — линейное увеличение корректора, $\overline{f}'_к$ — его приведенное (для всей системы $f' = 1$) фокусное расстояние; $\gamma_{зр}$ — угловое увеличение в зрачках переменной части; S_j и $S^в_j$ вычислены при нормировке $\alpha_1 = 0$; $h_1 = 1$, $\beta_1 = 1$; $f' = 1$ и соответственно $f'_в = 1$; $S^к_j$ — при нормировке $\alpha_1 = 1$, $\beta_1 = 1$, $f'_{кор} = 1$.

При расчете панкратических объективов часто встает задача получения системы с другими оптическими характеристиками при использовании той же схемы объектива или необходимости увеличения ее переменной части для уменьшения аберраций системы. Суммы Зейделя $\overset{*}{S}_j$ преобразованной системы можно вычислить по формулам:

$$\overset{*}{S}_{I} = n^3\beta^3_к S^в_{I} + \frac{k}{mn}\overline{f}'_к \overset{*}{S}{}^к_{I},\quad \overset{*}{S}_{II} = n^2\beta^2_к S^в_{II} + \frac{k}{mn}\gamma_{зр}\overline{f}'_к \overset{*}{S}{}^к_{II},$$

$$\overset{*}{S}_{III} = n\beta_к S^в_{III} + \frac{k}{mn}\overline{f}'_к \gamma^2_{зр} \overset{*}{S}{}^к_{III};\quad \overset{*}{S}_{IV} = n\beta_к S^в_{IV} + \frac{mn}{k}\,\frac{1}{\overline{f}'_к}\,\overset{*}{S}{}^к_{IV};$$

$$\overset{*}{S}_{V} = S^в_{V} + \frac{k}{mn} f'_к \gamma^3_{зр} \overset{*}{S}{}^к_{V},$$

где m — коэффициент изменения по подобию вариатора, n — изменение увеличения корректора при одновременном изменении в k раз его фокусного расстояния, $\overset{*}{S}{}^к_j$ — суммы корректора, вычисленные при новом его увеличении и нормировке $\alpha' = 1$, $\beta_1 = 1$, $f'_{кор} = 1$. Таким образом, задача расчета объектива с другими характеристиками сводится к: а) простому изменению по подобию в m раз вариатора, б) расчету корректора с требуемым увеличением и значениями его сумм $\overset{*}{S}{}^к_j$, находимым по заданным $\overset{*}{S}_j$ и известным $S^в_j$.

Для систем насадка—объектив при переходе к другим характеристикам целесообразно сохранять угловые аберрации насадки неизменными, тогда величина $C = \frac{f'_{\max} \varepsilon}{D_н}$ также остается неизменной. В этом случае для S_{IV} справедлива формула

$$S_{IV} = k \frac{C}{\varepsilon} \pi \sum \varphi_i + \Gamma S^0_{IV},$$

где $k = \frac{\Gamma a}{\Gamma_{\max}}$ и $a = \frac{\overline{D}_н}{D_н}$ — отношение длин «тонкой» и «толстой» насадок; φ_i вычисляются в масштабе $\overline{D}_н = 1$. Так как $\sum \varphi_i$ всегда отрицательна, то переход к менее светосильным системам ведет к переисправленной сагиттальной кривизне, и наоборот, при увеличении относительного отверстия кривизна, как правило, недоисправлена.

В главе 4 изложены некоторые приемы и особенности коррекции объективов большой кратности, даны рекомендации по выбору конструкций компонентов систем.

Найдено, что при предварительном аберрационном расчете, как и при исследовании в гауссовой области, целесообразно считать, что система состоит из насадки и объектива. Для наиболее распространенной на практике четырехкомпонентной системы основные параметры ее компонентов предлагается определять из следующих условий:

$$(S^н_I)_1 \Gamma_1 = (S^н_I)_2 \Gamma_2; \quad (S^н_{III})_1 = -\Gamma_1$$
$$(S^н_I)_1 \Gamma_1 = (S^н_I)_3 \Gamma_3; \quad (S^н_{III})_2 = -\Gamma_2$$
$$(S^н_{II})_1 = (S^н_{II})_2; \quad (S^н_{III})_3 = -\Gamma_3$$
$$(S^н_{II})_1 = (S^н_{II})_3; \quad (S^н_V) = a,$$

где a — задается, исходя из допустимой дисторсии.

Выходной зрачок насадки должен быть вынесен за ее последний компонент, с ним совпадает расположенный за насадкой тонкий объектив. Основные параметры его определяются после нахождения $P_i; W_i (i = 1, 2, 3, 4)$ из условия исправления сферической аберрации и комы всей системы по формулам

$$P_{об} = -S^н_I \Gamma;$$
$$W_{об} = -S^н_{II}.$$

Для быстрого нахождения значений основных параметров вполне оправдан прием, при котором одно из уравнений коррекции исключается и оставшиеся семь уравнений с восемью неизвестными решаются относительно одного из свободных параметров. При графическом представлении (свободный параметр откладывается по оси абсцисс, остальным соответствуют наклонные прямые) такого решения легко находится область оптимальных значений P_i; W_i. Особенно удобно это для нахождения решений, удовлетворяющих условию уменьшения трудноисправимых аберраций, например дисторсии.

Как показали исследования, приемлемые конструктивные элементы компонентов получаются при выполнении условия $-1{,}5 < P_{\min} < 2$, где $P_{\min} = P - 0{,}85\ (W - 0{,}15)^2$; особенно выгодны величины основных параметров, близкие к нулевым значениям: $P_i; W_i \approx -0{,}5 \div 2$. В случае больших положительных значений $P \gg 0$ необходимо стремиться к решениям с $W > 0$ для отрицательных компонентов и $W < 0$ для положительных компонентов. Тогда их конструкции имеют форму менисков с положительными радиусами кривизны. Поскольку входной зрачок значительно «утоплен» относительно первых компонентов, это предотвращает рост полевых аберраций высших порядков (астигматизма, дисторсии).

С учетом условий работы компонента и значений P и W, выбирается его конструкция. При величинах $h\varphi \leqslant 0{,}3$ можно использовать склеенный или расклеенный компоненты, при $h\varphi = 0{,}4 \div 0{,}5$ следует применять трехлинзовые и более сложные конструкции компонентов. Источником аберрации высших порядков, зависящих от апертуры (сферической комы), являются наиболее крутые поверхности в компонентах. Минимальные приведенные $(f'_i = 1)$ радиусы компонентов поэтому должны удовлетворять условию

$$R_{пр} \geqslant (1{,}5 \div 2)\, h\varphi.$$

Для получения конструкций компонентов с радиусами малой кривизны целесообразно применять в них марки стекол с большими показателями преломления (ТФ, СТК, ТБФ). Для этой же цели в склеенных линзах при $W \geqslant 1{,}5 \div 2$ следует применять комбинации флинт—крон, при $W \leqslant 0 \div 1$ — комбинации крон—флинт.

В компонентах, состоящих из склеенной и простой линз и двух склеенных линз, имеется параметр $\alpha_5 = \frac{\varphi_1}{\varphi}$ (распределение сил его частей) для исправления аберраций высших порядков при сохранении неизменными P и W компонентов. Эффективным приемом ослабления высших порядков сферической аберрации является осуществление конструкции из двух одинаковых и равных по оптическим силам частей; параметры $P_{0,5}$; $W_{0,5}$ «половинки» определяются через P и W всего компонента по формулам:

$$P_{0,5} = 4(P - W) + 1,$$
$$W_{0,5} = 2W - 1{,}35.$$

Для уменьшения полевых аберраций высших порядков в ходе коррекции радиусы компонента можно изменить в нужную сторону при сохранении неизменными аберрации его третьего порядка. При этом, если в компоненте из двух частей $\varphi_1 = \varphi_2$, то

$$\Delta P_1 = -\Delta P_2 - 4\Delta W_2,$$
$$\Delta W_1 = -\Delta W_2.$$

Необходимо также, чтобы в компонентах отсутствовали склеенные поверхности большой кривизны — основной источник сферохроматизма. Для уменьшения вторичного спектра следует использовать схемы с малой оптической силой первого компонента. Особенно выгодно, как показано на численных примерах, осуществлять первый компонент в виде апохромата. Последнее позволяет почти на порядок уменьшить вторичный спектр в длиннофокусном положении.

Найдено, что в системах большой кратности существует разделение влияния параметров:

а) первые компоненты практически не действуют на сферическую аберрацию и кому при f'_{min}; эти аберрации следует исправлять параметрами последних компонентов;

б) параметры первых компонентов сильно действуют на аберрации при f'_{max}, а также дисторсию и астигматизм при f'_{min}. Все это необходимо учитывать при коррекции, особенно тонкой доводке систем, в том числе и на ЭВМ.

Содержание последней, пятой, главы диссертации составляют результаты численных аберрационных исследований объективов. На примере системы с двадцатикратным перепадом рассмотрен вопрос об изменении аберраций третьих и высших порядков при переходе от «тонкой» системы к компонентам конечной толщины. Для определения высших порядков из результатов расчета лучей на ЭВМ вычитались аберрации третьих порядков. При этом были выделены отдельные составляющие третьих и высших порядков следующих аберраций; сферической, комы и кривизны (меридиональной и сагиттальной), дисторсии, а также меридиональная и сагиттальная составляющие четных аберраций высших порядков (без сферической аберрации и кривизны в них). Результаты этих исследований показывают:

1. Как в «толстой», так и «тонкой» системах значительных величин достигают аберрации высших порядков: дисторсия, астигматизм, кривизна при f'_{min}; кома, высшие порядки меридиональных составляющих симметричных аберраций при f'_{max}.

2. При переходе к компонентам конечной толщины независимо от способа их введения названные выше аберрации высших порядков значительно меняются и дальнейшую коррекцию с их учетом необходимо вести с помощью автоматизированных программ на ЭВМ.

В то же время в результате проведенных численных исследований найдено, что в окончательных вариантах систем значения основных параметров компонентов, хотя и отличаются от первоначальных, но не в значительной степени. Найденная с помощью метода основных параметров область решения сохраняется. Это служит одним из доказательств эффективности и полезности использования метода основных параметров для расчета систем с весьма высокими характеристиками.

Эффективность предложенных приемов и методики расчета иллюстрируется расчетами ряда объективов, приведенных в конце диссертации. Два из них — четырехкомпонентные системы с «внутренней» механической компенсацией, крайние компоненты которых неподвижны. В обеих схемах первый компонент положительный, второй — отрицательный, перемещающийся по винтовой направляющей, третий — положительный, перемещающийся по кулачковой направляющей.

Первый из них — киносъемочный объектив для 16 *мм* кинокамер с параметрами $f' = 12$—240, $1:3{,}5 - 1:4{,}8$, $2\beta = 3$—$55°$; $2y' = 12{,}5$ *мм*. Система является первым отечественным объективом—анастигматом с двадцатикратным перепадом. При высокой степени коррекции аберраций система имеет небольшие габариты (максимальный диаметр 73 *мм*, длина без отрезка 193 *мм*), близкие к габаритам известных объективов в два раза меньшим десятикратным перепадом, и обычную для панкратических объективов по сложности (пятнадцать линз) оптическую схему.

Второй — киносъемочный светосильный объектив с десятикратным перепадом для 8 *мм* кинокамер с параметрами: $f' = 6{,}5$—65 *мм*, $1:1{,}8$, $2\beta = 58$—$6°$, $2y' = 7$ *мм*. Система имеет очень высокое качество изображения: разрешающая сила в изготовленных образцах в центре 60—80 *мин/мм*, по полю зрения не менее 40 *мин/мм* — 50 *мин/мм*, что выше, чем в существующих панкратических объективах меньшей кратности.

Для двух других объективов в качестве исходных были использованы многокомпонентные (пять и шесть компонентов) схемы с линейной кинематикой. Увеличение числа компонентов позволило уменьшить их оптические силы и получить значительно более широкие допуски на перемещения компонентов, чем в системах с механической компенсацией, что упрощает изготовление и особенно сборку объективов.

Одна из систем — телевизионный длиннофокусный объектив с параметрами: $f' = 160$—960, $1:4 - 1:8$, $2y' = 40$ *мм*, длина $D \approx 0{,}75$, $f'_{\max} = 736$ *мм*. По качеству изображения объектив превосходит существующие длиннофокусные объективы для телевидения.

Вторая система — киносъемочный (16 *мм* кадр) объектив с параметрами $f' = 14$—112, $1:2{,}5 - 1:3$, $2\beta = 6$—$50°$, $2y' = 12{,}5$ *мм*, общая длина 225 *мм*. Недостатком объектива по сравнению с лучшими системами является несколько бо́льшая длина и диаметры первого и второго компонентов, что явилось следствием применения схемы с линейной компенсацией и отрицательным первым компонентом.

Последние два примера показывают, что в схемах с линейной компенсацией при переходе к компонентам конечной толщины кратность уменьшается и для сохранения ее приходится изменять кинематику системы и вводить малое линейное перемещение на один из компонентов (в одном объективе на первый, во втором — на последний). Осуществление систем с чисто линейной компенсацией возможно в случаях, когда к их габаритам (длине) не предъявляется жестких требований или в случае их малой светосилы.

ВЫВОДЫ

1. Установлены общие свойства, присущие различным схемам объективов с большой кратностью изменения фокусного расстояния, дающие возможность получить в них высокие оптические характеристики и одновременно малую длину.

2. Найдено соотношение между длиной и оптическими параметрами системы, позволяющее сравнивать объективы и руководствоваться в первом приближении в вопросе выбора возможных характеристик (кратности, длины, светосилы) вновь разрабатываемых систем.

3. Разработана методика определения параксиальных элементов многокомпонентных объективов с линейно перемещающимися компонентами путем синтеза их из четырехкомпонентных систем. Задача сводится к решению системы линейных уравнений и нескольких уравнений второй степени.

4. Выведены соотношения, которым должны удовлетворять оптические силы компонентов системы, для получения в ней внутренней (без увеличения длины) механической компенсации.

5. Предложен способ нахождения в гауссовой области систем с минимальными габаритами и наибольшими коррекционными возможностями на основе расчета двух параксиальных лучей.

6. С помощью этого метода показано, что схемы с первым положительным и отрицательным вторым компонентом большой оптической силы позволяют получать большое угловое поле зрения и светосилу объектива при его малой длине. Схемы с отрицательным первым компонентом приводят при тех же характеристиках к значительно бо́льшим габаритам.

7. Предлагается основные параметры тонких компонентов переменной части определять, исходя из условий стабилизации ее аберраций. Особенно удобно для этой цели графическое представление решений линейной системы уравнений. Затем рассчитывается корректор с аберрациями противоположного знака и равными стабилизированным аберрациям вариатора.

8. Найдено, что при переходе к «толстым» компонентам значительно меняются аберрации высших порядков и дальнейшую коррекцию целесообразно вести с их учетом с помощью автоматизированных программ. В процессе подгонки на ЭВМ определенные на первом этапе значения основных параметров меняются в незначительной степени, область решения сохраняется.

9. Сформулированы требования к конструкциям компонентов, обеспечивающие в системе малые величины аберраций высших порядков и хроматических вторичных аберраций.

10. Приведены результаты расчетов четырех объективов (наибольший перепад — 20 *крат*), иллюстрирующие предложенные приемы и методику расчета.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Шпякин М. Г., Объективы с широким интервалом изменения фокусных расстояний, ОМП, 1967, № 4, стр. 54.

2. Шпякин М. Г., Выбор исходной схемы объектива с переменным фокусным расстоянием и соотношения между его длиной и оптическими параметрами, ОМП, 1968, № 8, стр. 28.

3. Шпякин М. Г., Расчет в параксиальной области панкратических объективов большой кратности с линейно перемещающимися компонентами, ОМП, 1969, № 8, стр. 22.

4. Шпякин М. Г., Расчет панкратического объектива-анастигмата особо большой кратности, ОМП, 1970, № 1, стр. 25.
5. Волосов Д. С., Шпякин М. Г., Объектив с переменным фокусным расстоянием Авт. свид. № 251858, Бюлл. изобр., 1969, № 28.
6. Волосов Д. С., Карасева И. Я., Лев Г. А., Шпякин М. Г., Объектив с переменным фокусным расстоянием, Авт. свид. № 251857, Бюлл. изобр., 1969, № 28.
7. Волосов Д. С., Шпякин М. Г., Бушмакин Н. И., Объектив с широкими пределами изменения фокусных расстояний, Авт. свид. № 287351. Бюлл. изобр., 1970, № 35.

М-07461. Подп. к печати 22.3.71. Объем 1,375 п. л. Тип. ГОИ. Тир. 200 экз. Бесплатно.