

М. С. СТЕФАНСКИЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ СВЕТОСИЛЬНЫХ  
АФОКАЛЬНЫХ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ  
СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ НАСАДОК  
К ОБЪЕКТИВАМ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО  
ИЗМЕНЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Автореферат диссертации, представленной  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

6  
А3

Работа выполнена в Государственном ордена Ленина  
Оптическом институте имени С. И. Вавилова

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ СВЕТОСИЛЬНЫХ  
АФОКАЛЬНЫХ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНЫХ  
СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ НАСАДОК  
К ОБЪЕКТИВАМ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО  
ИЗМЕНЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ

Автореферат диссертации

Введение

Оптические системы, позволяющие плавно менять масштаб изображения, получают все более широкое распространение. Такие системы применяются в кинотехнике, телевизионной съемке, а также в некоторых фотографических и проекционных установках.

Очевидна целесообразность применения объективов с переменным фокусным расстоянием в процессе кино съемки в том случае, когда объект съемки недоступен. Как известно, с помощью объектива с переменным фокусным расстоянием можно добиться приблизительно того же эффекта, что и передвижением кинокамеры в процессе съемки по направлению к сцене и обратно. Из иностранной литературы известно о существовании ряда объективов переменного фокусного расстояния («Зуммар», «Пан-Синор», «Пентовар» и др.), нашедших применение в практике кино съемки и телевидения.

Ряд систем с переменным фокусным расстоянием был разработан в Государственном Оптическом институте. Еще в 1937 г. Д. С. Волосовым рассчитан объектив «Идар». Несколько систем было рассчитано также в послевоенные годы. Расчету объектива «Идар» предшествовали подробные исследования «обобщенного триплета» — трехкомпонентного объектива с переменным фокусным расстоянием.

В этой работе Д. С. Волосовым впервые был использован метод основных параметров тонких компонентов (метод разделения переменных) применительно к системам с переменным фокусным расстоянием.

192370

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР

Успешное применение этого метода при исследовании «общенного триплета» послужило основанием для применения его в диссертации при расчете систем «насадка—объектив».

Одним из способов осуществления системы с переменным фокусным расстоянием является установка впереди объектива с постоянным фокусным расстоянием афокальной системы (насадки) с переменным угловым увеличением. Такие насадки, будучи установлены впереди объектива, образуют вместе с последним систему переменного фокусного расстояния «насадка—объектив». Величина фокусного расстояния такой системы пропорциональна переменному угловому увеличению насадки.

Если длина телескопической насадки достаточно велика, то изменение ее увеличения достигается перемещением длиннофокусных компонентов, работающих при сравнительно небольших значениях относительных отверстий и углов поля зрения, что существенно облегчает задачу исправления аберраций.

Рассмотрению вопросов теории расчета светосильных насадок переменного увеличения посвящена данная работа.

### Содержание диссертации

1. При задании уравнений движения компонентов афокальной насадки выполнялось следующее условие, упрощающее кинематику: перемещение компонентов относительно некоторой неподвижной плоскости (начала отсчета) пропорционально перемещению  $\delta$  одного из компонентов, иными словами, уравнения движения компонентов линейны. При этом допустимы отступления от афокальности насадок в небольших пределах.

Если выполнено это условие, то три величины:  $L = \frac{1}{s'}$  — сходимости параксиальных лучей по выходе из насадки;  $\varphi$  — оптическая сила насадки и  $\Gamma$  — ее угловое увеличение, связанные между собою зависимостью

$$L = \varphi \Gamma,$$

могут быть представлены в виде полиномов различных степеней относительно переменной  $\delta$ . Коэффициенты полиномов — функции величин оптических сил насадки и коэффициентов уравнений движения.

Из анализа выражений  $L(\delta)$ ,  $\varphi(\delta)$  и  $\Gamma(\delta)$  следует, что насадка, состоящая из четырех компонентов, может быть строго афокальна не больше, чем при трех значениях величины  $\delta$ .

При выводе расчетных формул нами выполнялись следующие три условия, приближенно обеспечивающие афокальность насадки, состоящей из четырех бесконечно тонких компонен-

тов: насадка должна быть афокальна при двух крайних положениях компонентов (при значениях  $\delta$ , равных 0,  $\delta_m$ ) и при среднем  $\frac{\delta_m}{2}$ , где  $\delta_m$  — наибольшее значение параметра  $\delta$ .

В дальнейшем при окончательном расчете параксиальных элементов насадки возможен переход от  $\varphi(\delta)$  и  $L(\delta)$  к полиномам, которым соответствует более строгое выполнение условия афокальности на всем интервале изменения  $\delta$ . Переход достигается заданием оптическим силам компонентов насадки небольших изменений, не влияющих на переменное увеличение насадки, но изменяющих соответствующим образом коэффициенты полиномов  $\varphi(\delta)$  и  $L(\delta)$ .

Таким способом, допустив некоторые приближения, от полинома  $\varphi(\delta)$  можно перейти к полиному Чебышева 3-й степени, наименее отклоняющемуся от нуля. От  $L(\delta)$  можно перейти к полиному  $L'(\delta)$ , удовлетворяющему условию минимума интеграла

$$\int_0^{\delta_m} L'^2(\delta) d\delta.$$

Возможность таких переходов иллюстрирована на численных примерах.

Аналитические выражения, полученные из упомянутых выше трех условий, приближенно обеспечивающих афокальность насадки, а также из условия масштаба, условия заданной кратности изменения увеличений  $m = \frac{\Gamma_1}{\Gamma_2}$  и равенства нулю расстояний между компонентами II и III при  $\delta = \delta_m$  дали систему из 6 уравнений, совместное решение которых привело к расчетным формулам.

Особый интерес представляет тот частный случай осуществления четырехкомпонентной насадки (тип  $\bar{A}$ ), когда при одном из крайних значений увеличения  $\Gamma$  компоненты I—II и III—IV совпадают.

На чертежах 1а, 1б, 1в представлена насадка типа  $\bar{A}$  при одном промежуточном и двух крайних положениях ее компонентов.  $MN$  — неподвижная плоскость, в которой находится компонент I при  $\delta = 0$ ,  $D'$  — расстояние от плоскости  $MN$  до неподвижного компонента IV.

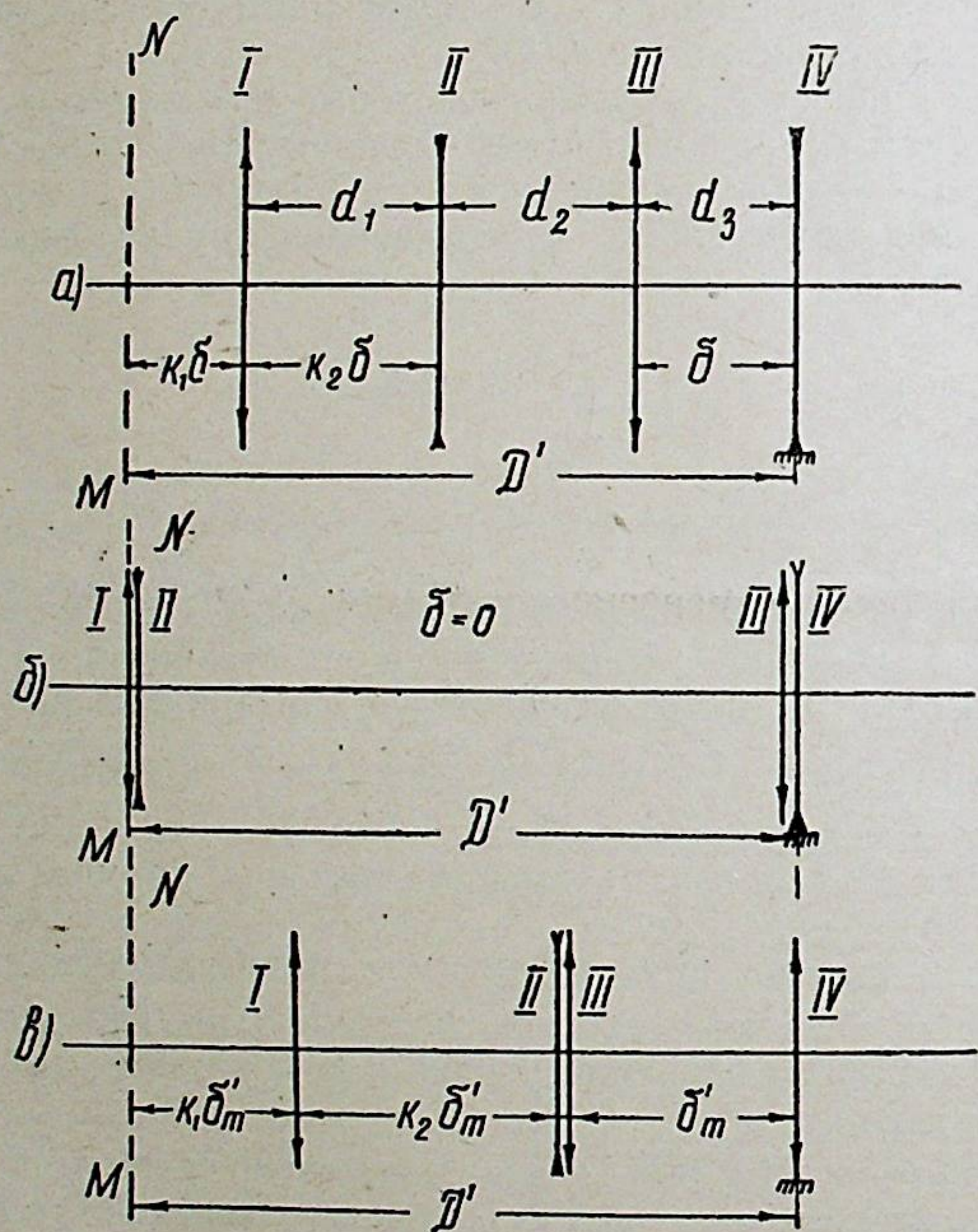
Расстояния  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  выражаются через параметр  $\delta$  следующим образом:

$$d_1 = k_2 \delta; d_2 = D' - (k_1 + k_2 + 1) \delta; d_3 = \delta.$$

Показано, что определение численных значений параксиальных элементов насадки А (общий случай), удовлетворяющей упомянутым выше 6 условиям, всегда может быть осуществлено в следующем порядке:

1) выполнен расчет насадки типа  $\bar{A}$ , удовлетворяющей тем же 6 условиям;

2) по известным значениям параксиальных элементов насадки  $\bar{A}$  определяются параксиальные элементы искомой насадки А.



Черт. 1. Схема четырехкомпонентной насадки типа  $\bar{A}$ .

Поэтому общий случай — расчет параксиальных элементов насадки А всегда начинается с расчета соответствующей насадки типа  $\bar{A}$ , для которой и выведены расчетные формулы.

Переход к насадкам типа А не представляет затруднений.

Четырехкомпонентная насадка типа  $\bar{A}$  в параксиальной области характеризуется значениями 8 величин. Поэтому расчетные формулы, полученные в результате совместного решения 6 уравнений, позволяют получить значения всех неизвестных величин по значениям двух заданных свободных параметров. Степень сложности формул зависит от выбора этих параметров.

Переменное увеличение  $\Gamma$  может быть выражено в зависимости от величины  $\delta$  следующим образом:

$$\Gamma = \Gamma_1 \left[ 1 + \left( 4c - 3 - \frac{1}{m} \right) \frac{\delta}{\delta_m} + \left( -4c + 2 + \frac{2}{m} \right) \frac{\delta^2}{\delta_m^2} \right],$$

где  $c = 1 + \beta \left( \frac{1}{m} - 1 \right)$ ;

$\Gamma_1$  — угловое увеличение насадки при условии  $\delta = 0$ ,  
 $m$  — отношение угловых увеличений насадки при крайних положениях ее компонентов,  
 $\delta_m$  — наибольшее значение  $\delta$ ,  
 $\beta$  — некоторый коэффициент.

Оказалось, что расчетные формулы отличаются сравнительной простотой в том случае, когда в качестве упомянутых выше двух свободных параметров принимается коэффициент  $\beta$ , характеризующий изменение увеличения  $\Gamma$  в зависимости от  $\delta$  и  $\varphi'_3$  (оптической силы третьего компонента).

В результате первая группа формул имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \varphi'_4 &= \frac{r_1 \varphi'_3}{r_2 \varphi'_3 - r_1}, & \varphi'_1 &= \left[ \frac{\varphi'_3 + \varphi'_4}{\Gamma_1} + \varphi'_2 \right], \\ D' &= \frac{B}{\varphi'_3}, & k_2 &= \frac{\Gamma_1 - m(1 - \varphi'_4)}{\Gamma_1 \varphi'_1}, \\ \Gamma_1 &= 1 - (\varphi'_3 + \varphi'_4) D', & k_1 &= D' - k_2 - 1, \\ \varphi'_2 &= \frac{(m-1)(\varphi'_3 + \varphi'_4) - m\varphi'_3 \varphi'_4}{\Gamma_1 - (1 - \varphi'_4)m}, & \delta'_m &= 1, \end{aligned} \right\}$$

где

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{1}{2}(1+m)c - 1; & r_2 &= \frac{1}{2}(mc - 1); \\ c &= 1 + \left( \frac{1}{m} - 1 \right) \beta; & B &= \frac{-r_1^2}{-\frac{1}{2}(c-1)r_2 + \frac{1}{4}r_1}; \end{aligned}$$

$\varphi'_1, \varphi'_2, \varphi'_3, \varphi'_4$  — величины оптических сил бесконечно тонких компонентов насадки,

$k_1, k_2$  — коэффициенты уравнений движения,

$D'$  — длина насадки при условии  $\delta = 0$ ,

$\delta'_m$  — наибольшее значение величины  $\delta$ .

Выбор величины  $\beta$  в качестве переменного параметра упрощает также численные исследования, так как дает возможность учесть некоторые преимущества насадок типа  $\bar{A}$ , которым соответствуют значения  $\beta$ , находящиеся в пределах, определяемых неравенством

$$0,25 < \beta < 0,75.$$

В тех случаях, когда в качестве свободных параметров задаются не  $\beta$  и  $\varphi'_3$ , а другие величины, в частности коэффициенты уравнений движения компонентов, появляется необходимость решать уравнения высоких степеней или, что нами и было сделано, применять метод постепенных приближений. Для этой цели служит приведенная в диссертации вторая группа формул.

2. Вычисления с помощью первой группы формул позволили провести систематические численные исследования с целью нахождения и подробного изучения оптимальных областей решений, содержащих варианты четырехкомпонентных насадок, представляющих практический интерес.

В результате численных исследований найдены области решений насадок, характеризующихся малыми абсолютными значениями оптических сил компонентов и одновременно малыми значениями  $S_{IV}$ . Эти области решений были исследованы более подробно.

Как показали вычисления, осуществленные с помощью второй группы формул, варианты насадок, относящиеся к этим областям, кроме перечисленных выше преимуществ, характеризуются также небольшими значениями величин  $|\varepsilon|$  — наибольших отступлений от афокальности насадки на всем промежутке изменения параметра  $\delta$ .

Величины  $|\varepsilon|$  определялись в предположении, что зависимость афокальности насадки  $\varphi$  от  $\delta$  соответствует полиному Чебышева 3-й степени. Оценка численных значений  $|\varepsilon|$  приводит к выводу, что в системе «насадка—объектив» с 4-кратным (и меньшим) изменением фокусного расстояния возможно применение четырехкомпонентных насадок с линейным ходом компонентов.

3. В том случае, когда перемещение компонентов по линейному закону не обеспечивает достаточно строгого выполнения условия афокальности в насадке, состоящей из 4-х компонентов, вводится небольшое перемещение компонента IV —  $\Delta$ , равное  $-\frac{L}{\varphi'_4}$ , где  $\varphi'_4$  — оптическая сила компонента IV.

4. Расчет насадок по заданным коэффициентам уравнений движения производится с помощью второй группы формул, применение которой предполагает знание приближенного значения некоторых величин. Для определения последних в диссертации приводится ряд специальных таблиц и графиков.

Численные исследования, относящиеся к упомянутым выше оптимальным областям решений, показали, что тот случай осуществления четырехкомпонентной насадки, когда неподвижны оба крайних компонента (I и IV), представляет особый интерес, так как соответствующие ему варианты насадок, находясь внутри упомянутых выше областей решений, обладают целым рядом преимуществ, а именно: наименьшими значениями оптических сил отдельных компонентов, наименьшими значениями коэффициента  $S_{IV}$ , а также наилучшим выполнением условия афокальности.

В диссертации даны формулы, позволяющие в данном частном случае определять все параксиальные элементы насадки по заданным значениям двух параметров  $\beta$  и  $m$ .

Там же помещен ряд графиков, позволяющих приближенно определять параксиальные элементы таких насадок.

5. Трехкомпонентная насадка (черт. 2), удовлетворяющая условию линейности хода компонентов в параксиальной области, определяется 6 величинами и может строго удовлетворить условию афокальности не более, чем при двух значениях параметра  $\delta$ .

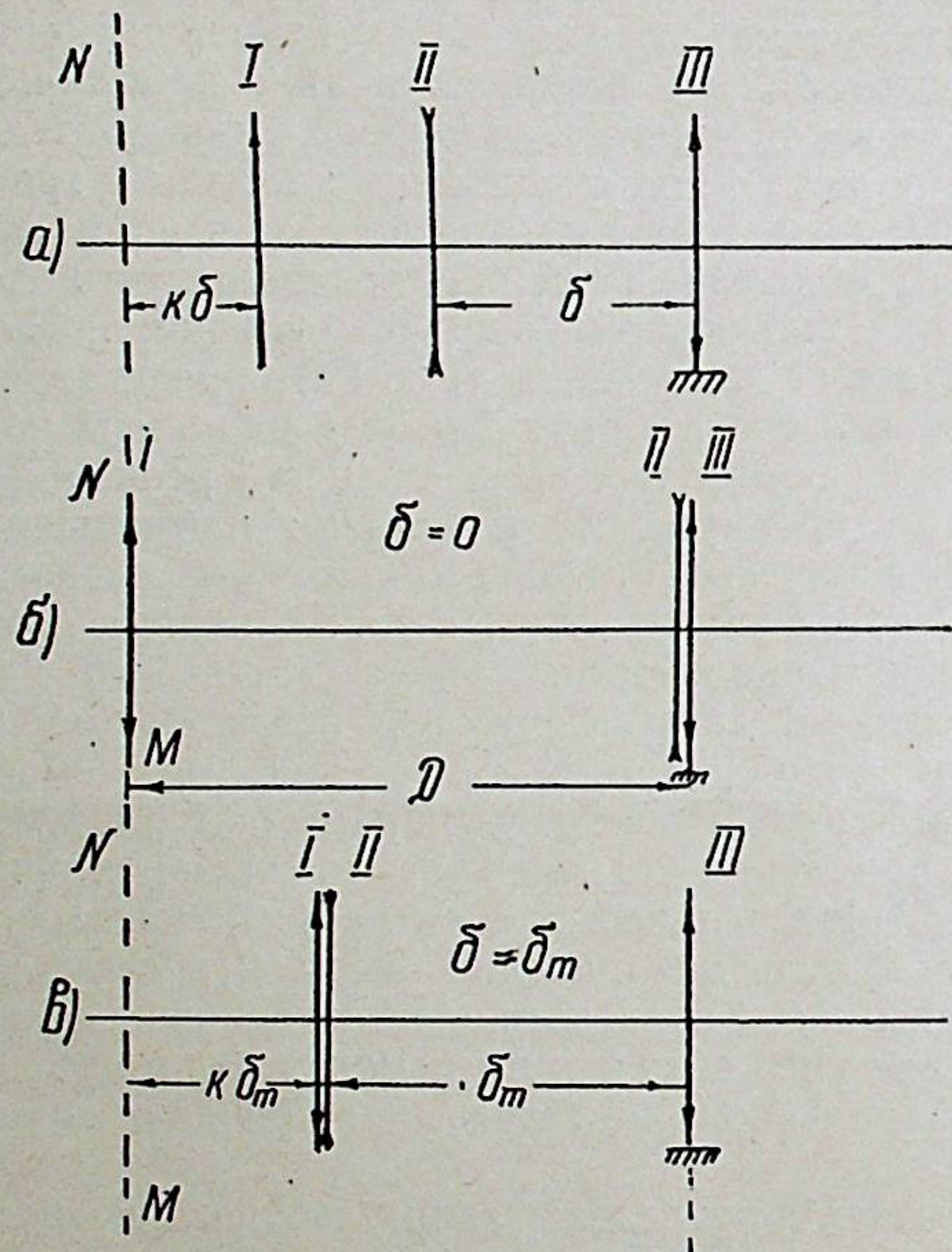
В диссертации приведены формулы, дающие возможность определить все параксиальные элементы трехкомпонентной насадки по двум заданным величинам: кратности изменения увеличений  $m$  и оптической силе компонента II —  $\varphi'_2$ .

Расчетные формулы выведены в предположении, что насадка строго афокальна при  $\delta = 0$  и  $\delta = \delta'_m$ .

В окончательном варианте насадки полином  $\varphi(\delta)$  может быть приведен к полиному Чебышева 2-й степени.

Численные исследования показали, что варианту трехкомпонентной насадки, состоящей из двух крайних компонентов, фокусные расстояния которых положительны и равны между собою, и одного внутреннего отрицательного, соответствуют

наименьшие абсолютные значения оптических сил компонентов, а также наилучшее соблюдение условия афокальности. Однако и в этом случае отступления от афокальности настолько велики, что применение трехкомпонентной насадки с линейным ходом компонентов в системах «насадка—объектив», даже при очень малых кратностях изменения увеличений, не представляется возможным.



Черт. 2. Схема трехкомпонентной афокальной насадки.

По-видимому, наиболее целесообразно пользоваться упомянутым выше вариантом насадки (сохранить значения оптических сил), но при осуществлении кинематической схемы, отказавшись от условия линейности хода компонентов, соблюсти точно условие афокальности.

6. При расчете систем «насадка—объектив» в области aberrаций третьего порядка были использованы выражения для коэффициентов этих aberrаций, применяемые в практике работы наших вычислителей.

Применительно к случаю систем «насадка—объектив» разработаны некоторые приемы, облегчающие вычисление коэффициентов aberrаций третьего порядка, а также самих aberrаций.

В частности, рассмотрен следующий вопрос. Одна из возможностей значительно повлиять в процессе расчета на aberrации системы «насадка—объектив» заключается в изменении по подобию линейных размеров насадки А и объектива Б пропорционально коэффициентам подобия  $k$  и  $g$ . В диссертации приведены формулы, связывающие коэффициенты aberrаций третьего порядка исходной системы с коэффициентами aberrаций системы, полученной изменением по подобию и коэффициентами подобия  $k$  и  $g$ . Аналогичные формулы даны для aberrаций третьего порядка таких двух систем.

Приводим простые зависимости, связывающие aberrации третьего порядка исходной системы, состоящей из насадки и идеально исправленного объектива, с aberrациями системы, полученной из исходной по подобию в предположении, что относительное отверстие и линейное поле зрения остается без изменений.

Для поперечной сферической aberrации, комы и дисторсии:

$$\frac{\bar{\delta}y'_{\text{сф. аб}}}{\delta y'_{\text{сф. аб}}} = \frac{g^4}{k^3}, \quad \left| \frac{\bar{y}'_{\text{дист.}}}{y'_{\text{дист.}}} = \frac{1}{g^2} \right.$$

$$\frac{\bar{\delta}y'_{\text{комы}}}{\delta y'_{\text{комы}}} = \frac{g^2}{k^2},$$

Для отступлений фокальных точек сагиттального и меридиональных пучков от плоскости Гаусса

$$\frac{\bar{x}_s}{x_s} = \frac{1}{k}, \quad \frac{\bar{x}_m}{x_m} = \frac{1}{k}.$$

Буквами с черточками обозначены aberrации системы, полученной по методу подобия.

Все aberrации третьего порядка, кроме дисторсии, уменьшаются при увеличении конструктивных элементов насадки по подобию пропорционально различным степеням коэффициента  $k$ . Можно предполагать, что это уменьшение еще в большей степени относится к aberrациям высших порядков. Таким образом, с точки зрения aberrаций всегда выгодно увеличивать конструктивные элементы насадок по подобию.

Уменьшения дисторсии можно добиться, увеличивая фокусное расстояние объектива, т. е. снижая поле зрения системы «насадка—объектив».

7. В основу первой стадии абберационного расчета систем «насадка—объектив» положен метод основных параметров тонких систем. Пробные расчеты показали, что этот метод дает достаточную для практики степень точности и может быть рекомендован для расчета такого рода систем.

В следующих стадиях расчета после выбора конструкций отдельных компонентов и перехода к конечным толщинам применялась последовательная интерполяция по основным параметрам тонких компонентов.

Окончательное исправление aberrаций насадки производится на основании тригонометрического расчета лучей с учетом aberrаций высших порядков.

Коэффициенты aberrаций третьего порядка насадки, состоящей из 4 тонких компонентов, связаны линейно с основными параметрами  $\bar{P}_1, \bar{W}_1, \bar{P}_2, \bar{W}_2, \bar{P}_3, \bar{W}_3, \bar{P}_4, \bar{W}_4$  тонких компонентов. Задание соответствующих значений основным параметрам дает возможность приравнять к нулю или (в том случае, когда учитывается влияние толщин компонентов и высших порядков) к конечным величинам коэффициенты aberrаций 3-го порядка  $S_I, S_{II}$  для двух крайних значений увеличения и одного среднего, а также коэффициенты  $S_{III}$  для крайних увеличений. Исправление кривизны изображения (коэффициент  $S_{IV}$ ), не зависящего от параметров  $\bar{P}$  и  $\bar{W}$ , предусматривается в стадии расчетов, относящихся к параксиальной области.

Показано, что кривизна изображения 3-го порядка не зависит от увеличения насадки  $\Gamma$ . Поэтому достаточно эту aberrацию исправить для одного из положений компонентов.

Численные исследования показывают на сравнительную легкость получения систем с малыми полями зрения в том случае, когда размеры насадки достаточно велики. Возможность получения широкоугольных систем ограничивается величиной дисторсии, исправление которой представляет значительные трудности.

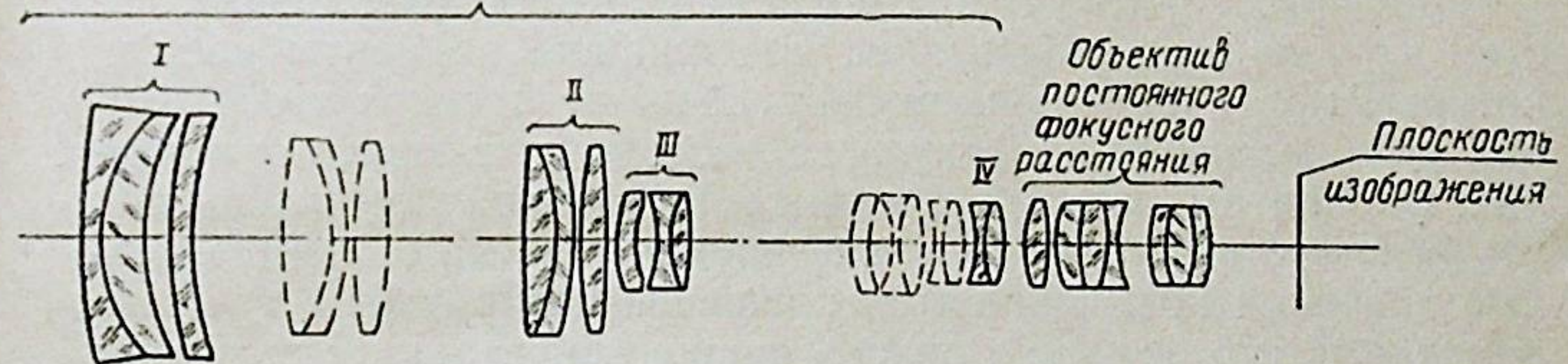
Численные исследования, выполненные с целью получения варианта насадки, характеризуемого возможно меньшим значением коэффициента  $S_y$  (при наименьшем фокусном расстоянии системы «насадка—объектив») при одновременном равенстве нулю коэффициентов  $S_I, S_{II}, S_{III}$  при соответствующих

положениях компонентов, привели к варианту «насадка—объектив» со сравнительно небольшой дисторсией. Дальнейшие шаги в целях уменьшения дисторсии, а следовательно, увеличения поля зрения системы «насадка—объектив», могут быть сделаны лишь в результате накопления материала по численным исследованиям насадок. При этом следует иметь в виду, что, кроме исправления третьих порядков, решающее значение приобретает выбор конструкций отдельных компонентов, определяющих высшие порядки системы.

8. В заключительной части диссертации приведено подробное описание расчета системы «насадка—объектив», в основу которого положен упомянутый выше вариант насадки, отличающийся сравнительно небольшим значением aberrации дисторсии.

Система (черт. 3), состоящая из четырехкомпонентной насадки и объектива Юпитер-7, характеризуется большой крат-

Телескопическая насадка переменного углового увеличения



Черт. 3. Объектив «НЕОН-1».

ностью изменения фокусных расстояний  $m=5,5$  (от 35 до 194 мм). Относительное отверстие, постоянное для всех значений фокусного расстояния, равно 1:3; линейное поле зрения также постоянно  $2y'=27$  мм.

Кинематическая схема афокальной насадки следующая.

Компонент I неподвижен при изменении увеличения насадки, а имеет лишь небольшие перемещения для дистанционной наводки. Внутренние компоненты II и III движутся с одинаковой скоростью до их взаимного соприкосновения. Компоненту IV даются небольшие перемещения, величины которых связаны нелинейной зависимостью с перемещениями компонентов II и III.

Окончательный вариант системы «насадка—объектив», получивший название «НЕОН-1», рассчитан для предмета, на-

ходящегося на расстоянии 6 м, и допускает дистанционную наводку с помощью подвижки первого компонента на расстоянии от 3 м до бесконечности.

Аберрации системы «НЕОН-1» исправлены лучше, чем у немецкой системы «Трансфокатор» (Astro-Gesellschaft), имеющей лишь четырехкратное изменение фокусного расстояния (от  $\bar{f} = 30$  до  $\bar{f} = 120$  мм).

При сравнении других систем переменного фокусного расстояния с системой «НЕОН-1» следует принять во внимание, что задание в последнем случае величины  $m$ , равной 5,5, большей, чем в какой-либо другой из известных нам систем, привело в процессе расчета к ряду специфических трудностей (вызванных большими оптическими силами компонентов, большими диаметрами входных зрачков и т. д.), для преодоления которых возникла необходимость в усложнении конструкции.

### Основные результаты работы

Найдены и исследованы области решений афокальных систем переменного увеличения, содержащие варианты систем, которые могут быть применены в качестве насадок к объективам для изменения их фокусного расстояния в широких пределах. Вариантам систем, относящимся к этим областям решений, соответствуют простые законы перемещения компонентов, малые значения коэффициентов кривизны изображения третьего порядка и, что особенно важно, сравнительно малые величины оптических сил отдельных компонентов.

Выполнение последних условий делает возможным создание достаточно светосильных систем «насадка—объектив».

Численные исследования аберраций третьего порядка, осуществленные с помощью метода основных параметров бесконечно тонких компонентов, указывают на сравнительную легкость получения систем с малыми полями зрения. Возможность получения широкоугольных систем ограничивается величиной аберрации дисторсии.

Исследования, предпринятые с целью нахождения варианта, характеризуемого малой величиной дисторсии при большом отношении крайних значений угловых увеличений афокальной насадки, привели к варианту тонкой системы, принятому в качестве исходного при расчете системы «НЕОН-1».

Эта система рассчитана с учетом конечных толщин компонентов насадки и высших порядков аберраций. Она характеризуется отношением крайних увеличений  $m = 5,5$  (большим,

чем в какой-либо из известных нам систем), постоянным относительным отверстием 1:3 и линейным полем зрения  $2y' = 27$  мм.

М. С. Стефанский

### Список статей, в которых опубликованы материалы диссертации

1. Стефанский М. С. Исследование и расчет афокальных светосильных систем переменного увеличения, применяемых в качестве насадок к объективам для изменения их фокусного расстояния. Труды ГОИ, т. XXVI, вып. 152, 1958.
2. Стефанский М. С. Расчет бесконечно тонкого объектива, состоящего из двухсклеенного компонента и простой линзы. Журнал Оптико-механическая промышленность, № 8, 1958.
3. Стефанский М. С. Объектив с переменным фокусным расстоянием «НЕОН-1». Журнал Оптико-механическая промышленность № 5, 1959.