

## Двухгрупповые панкратические объективы для цифровых камер

В.Г. Поспехов<sup>1</sup>, Т.С. Ровенская<sup>1</sup>, А.В. Крюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

*Описаны принципы построения и расчета двухгрупповых панкратических объективов для цифровых камер. Рассмотрены три типа структурного построения панкратических объективов, отличающихся порядком и знаком оптических сил входящих групп. Приведены формулы для расчета перемещения групп и положения плоскости изображения. Дан обзор оптических схем и основных характеристик современных двухгрупповых панкратических объективов на базе анализа патентных материалов.*

**E-mail:** rl-3bmstu@yandex.ru

**Ключевые слова:** панкратический объектив, оптическая схема, двухгрупповой объектив.

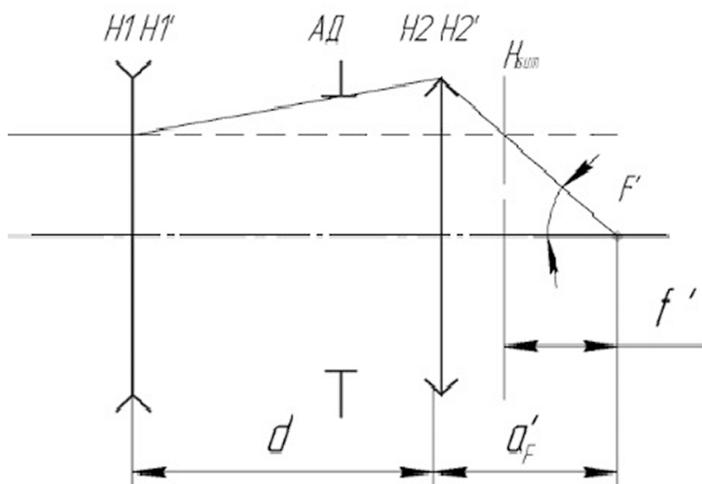
В настоящее время новый виток развития получили панкратические объективы, включающие две группы линз, изменение фокусного расстояния которых происходит в результате перемещения вдоль оптической оси обеих групп. При этом длина объектива изменяется ( $L = \text{var}$ ). Это связано с развитием технологии изготовления асферических поверхностей различного типа, созданием миниатюрных шаговых двигателей и разработкой оправ телескопического типа.

Цель работы — рассмотрение структур, оптических схем, характеристик, формул расчета, принципов построения и уровня аберрационной коррекции основных типов двухгрупповых панкратических объективов.

Реализация двухгрупповых панкратических объективов возможна в виде структурных схем трех типов, отличающихся порядком примененных положительных и отрицательных по оптической силе групп линз:

- тип А включает две группы положительной оптической силы;
- тип Б включает первую группу положительной силы и вторую группу отрицательной силы;
- тип В включает первую группу отрицательной силы и вторую группу положительной силы.

Задача габаритного расчета состоит в определении взаимного положения групп ( $d$ ) и положения второй группы относительно плоскости изображения ( $a'_F$ ) для ряда значений фокусного расстояния объектива ( $f'_\Sigma$ ) при условии сохранения неподвижной плоскости изображения (рис. 1), а также положения апертурной диафрагмы, зрачков и диаметров групп. При габаритном расчете схемы необходимо выбрать тип объектива, значения фокусных расстояний первой и второй групп ( $f'_1, f'_2$ ).



**Рис. 1.** Структурная схема двухгруппового панкратического объектива типа В

Для расчета оптических характеристик двухгрупповой системы могут быть применены известные формулы для двухгрупповой системы [1].

При использовании формул двухгрупповой системы после несложных преобразований можно перейти к решению квадратного уравнения относительно  $f_1'$  и  $f_2'$ , однако в результате решения уравнения можно получить отрицательные значения  $d$  и  $a_F'$ , что является недостатком такого подхода.

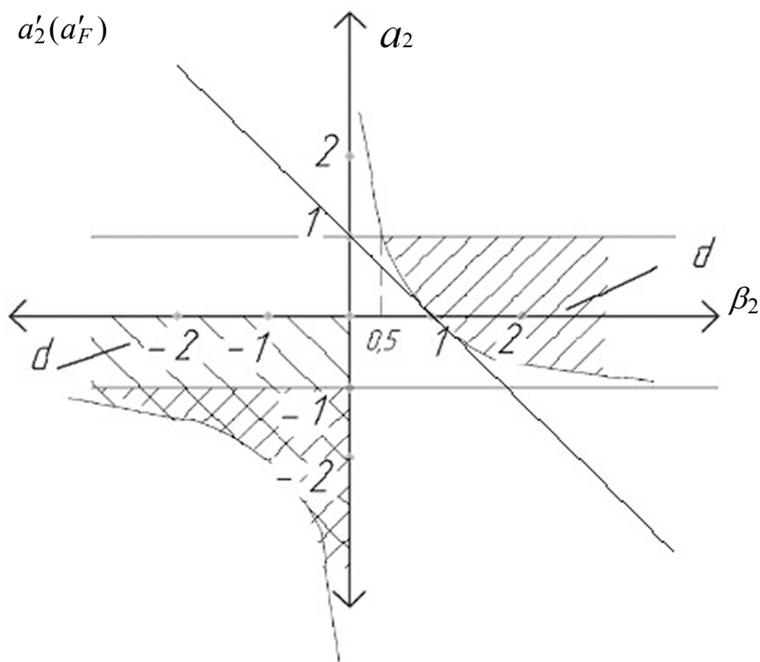
Более удобными являются формулы, связывающие основные параметры всей системы через линейное увеличение и фокусное расстояние ( $\beta_2, f_2'$ ) второй группы, перемещение которой вызывает изменение характеристик всей системы. При таком подходе формулы расчета будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned}
 f_{\Sigma}' &= f_1' \beta_2 = f_2' \beta_2 / K; \\
 a_F' &= a_2' = (1 - \beta_2) f_2'; \\
 a_2 &= (1 - \beta_2) f_1' / \beta_2; \\
 d &= f_1' - a_2; \\
 L &= a_F' + d,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $K = f_2' / f_1'$  — отношение фокусных расстояний групп;  $a_2$  — расстояние предметной плоскости относительно второй группы;  $L$  — длина объектива.

Формулы (1) позволяют установить области допустимых значений линейного увеличения  $\beta_2$  для каждого из приведенных выше типов объектива.

Для определения допустимых областей линейного увеличения  $\beta_2$  построим зависимости  $a'_2(a'_F)$  и  $a_2$  от  $\beta_2$ , нормированные к  $f'_2 = 1$  при  $K = 1$  для систем типа А и при  $K = -1$  для систем типа В.



**Рис. 2.** Зависимость положения предметной плоскости  $a_2$  и плоскости изображения  $a'_2(a'_F)$  от линейного увеличения  $\beta_2$

Соотношение  $K = \pm 1$  в двухгрупповых системах, как правило, характерно для большинства оптических систем по соображению исправления кривизны Петцваля, для которой имеет место следующее соотношение:

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^2 \frac{\varphi_i}{n_i},$$

где  $\varphi_i$  — оптическая сила  $i$ -й группы;  $n_i$  — эквивалентный показатель преломления  $i$ -й группы.

Прямая 1 на рис. 2 — закон изменения  $a'_2(a'_F)$  при изменении  $\beta_2$ . Закон изменения  $a_2$  представляет собой гиперболу, имеющую две асимптоты — ось ординат и прямую, пересекающую ось ординат при значении  $-1$ . Заштрихованная область на рис. 2 при  $\beta_2 > 0$ , представляет собой совокупность значений  $d$ , которые определяются как разность между фокусным расстоянием первой группы ( $f'_1 = 1$  — прямая, параллельная оси абсцисс) и значением  $a_2$  (правая ветвь гиперболы  $a_2$ ). На рис. 2 видно, что для объективов типа А ( $K = 1$ ,  $f'_2 = 1$ )

$a'_F \geq 0$  при  $-\infty < \beta_2 \leq 1$ , а  $d \geq 0$  при  $0,5 < \beta_2 < \infty$  и при  $\beta_2 < 0$ . Однако при  $\beta_2 < 0$ ,  $a_2 < 0$ ,  $a'_2 > 0$  имеет место образование промежуточного изображения после первой группы, что приводит к увеличению длины системы. Таким образом, малогабаритный панкратический объектив по схеме типа А может быть реализован только в малом интервале значений линейного увеличения  $0,5 < \beta_2 \leq 1$ .

Оптическая система объектива типа В может быть реализована только при  $\beta_2 < 0$ . На рис. 2 видно, что при  $\beta_2 \rightarrow 0$ ,  $a_2 \rightarrow \infty$ , следовательно, возрастает величина  $d$ , которая определяется как разность между фокусным расстоянием первой группы ( $f'_1 = -1$  — прямая, параллельная оси абсцисс) и значением  $a_2$  (левая ветвь гиперболы  $a_2$ ). На рис. 2 область значений  $d$  обозначена двойной штриховкой. При этом величина  $a'_F \geq 1$ , все это приводит к увеличению длины системы. Можно показать, что относительные отверстия первой и второй групп при выбранных условиях нормировки равны их диаметрам и зависят от положения апертурной диафрагмы:

$$D_1 = 2 \operatorname{tg} \omega_1 \frac{a'_p}{a'_p + 1} + D; \quad (2)$$

$$D_2 = D(a'_p + 1) + 2(d - a'_p) \operatorname{tg} \omega_1 \frac{1}{a'_p + 1},$$

где  $D_1, D_2$  — диаметры первой и второй групп;  $a'_p$  — расстояние от первой группы до апертурной диафрагмы;  $D$  — диаметр входного зрачка;  $\operatorname{tg} \omega_1$  — тангенс углового поля в пространстве предметов.

Из приведенных соотношений следует, что при размещении апертурной диафрагмы на первой группе максимальный диаметр (относительное отверстие) будет иметь вторая группа, в противном случае — первая. При размещении апертурной диафрагмы в промежуточном положении она должна иметь возможность перемещения, чтобы не мешать движению второй группы.

Для объектива, построенного по схеме типа Б, зависимости  $a_2, a'_2(a'_F)$  от линейного увеличения  $\beta_2$  нормируются при  $f'_2 = -1$ ,  $K = 1$ . Зависимости меняют области определения, но их характер сохраняется. В области значений  $-\infty < \beta_2 < 0$ ,  $a_2 > 1$ ,  $a'_F < 0$ , и объектив по схеме типа Б может быть реализован только в случае мнимой плоскости изображения. В области значений  $0 < \beta_2 < 1$ ,  $a_2 < 0$ ,  $a'_F < 0$  плоскость изображения также является мнимой. Область значений  $1 < \beta_2 < \infty$ , в которой  $a_2 > 0$ ,  $a'_F > 0$ , является благоприятной областью для реализации панкратических объективов по схеме типа Б.

Апертурную диафрагму в объективах такого типа лучше совмещать с первой подвижной группой.

Рассмотрим типичные оптические схемы двухгрупповых панкратических объективов на основе анализа патентных материалов [2—8]. Как показал анализ этих материалов, большинство объективов относится к двухгрупповым объективам типов Б и В. Объективы, построенные по структурной схеме типа Б, находят применение в визирно-дальномерных камерах, в которых не требуется большого заднего фокального расстояния.

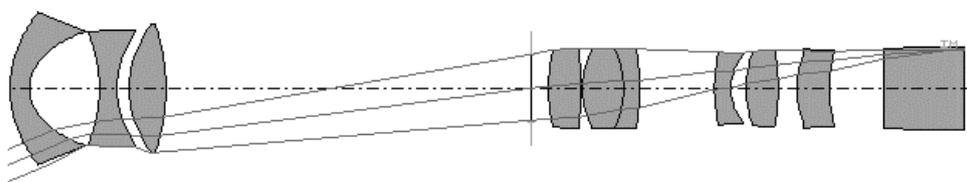
В таблице приведены оптические характеристики панкратических объективов, оптические схемы которых анализируются в данной работе.

### Оптические характеристики некоторых двухгрупповых панкратических объективов

Вариант объектива	$f'$ , мм	$M$ , кратность	$2\omega$ , град ( $2y'$ , мм)	Диафрагменное число $K$	Число линз/асферические поверхности	$L_{\max}$ , мм
[2] (пример 1)	5,9—14,7	2,5	64,8—28,8	2,8—5,2	7/2	55,95
[2] (пример 9)	5,9—14,7	2,5	64,8—28,8	2,8—5,2	9/1	59,6
[3] (пример 1)	5,5—16,0	2,9	71,9—26,4 (7,0)	2,9—4,8	5/3	33,5
[3] (пример 2)	3,8—11,0	2,9	80,6—30,6 (6,0)	3,0—4,7	5/3	35,5
[4]	2,8—7,3	2,6	93,7—35,0 (6)	1,9—3,1	6/2	—
[5]	36,3— 68,2	1,9	61,3—35,0 (43)	5,6—10,2	7/3	—
[6]	2,9—9,9	3,5	129,2—34,6 (6)	1,2—2,5	8/2	—
[7]	28,9— 78,0	2,7	73,5—31,0 (43,2)	3,6—9,8	6/3	—
[8]	29—106,3	3,7	73,5—24,2 (43,2)	5,8—13,0	8/3	—

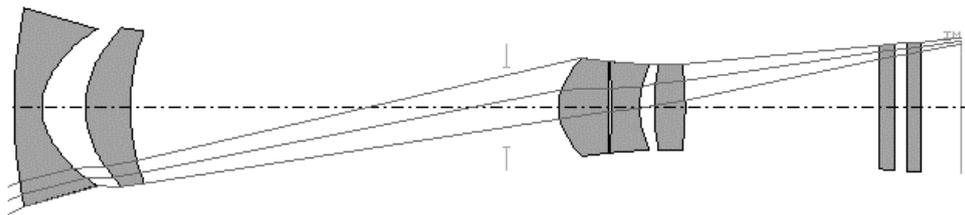
Оптическая схема объектива [2] представлена на рис. 3, оптические характеристики которого приведены в таблице (вариант [2] (пример 1)). Структурно объектив относится к объективам типа В, соотношение

фокусных расстояний  $K = -0,964$  ( $f'_1 = -13,79$  мм,  $f'_2 = 14,3$  мм). Первая группа включает три линзы, первая поверхность первой отрицательной линзы асферической формы (асферическая поверхность высокого порядка). Вторая группа включает две части: первая часть состоит из трех линз и имеет положительное фокусное расстояние ( $f'_{21} = 12,59$  мм), вторая часть включает три отдельно стоящих линзы, имеет слабую отрицательную силу ( $f'_{22} = -187,0$  мм) и выполняет роль компенсатора сферической aberrации и комы. Значение показателей преломления групп, их оптические силы подобраны таким образом, чтобы значение суммы Петцваля при минимальном фокусном расстоянии было близким к нулю:  $S_{IV} = -0,02$  ( $S_{IV1} = -0,31$ ,  $S_{IV2} = -0,29$ ). Отрицательная дисторсия и астигматизм исправляются путем введения асферики на первой поверхности схемы. Изменение фокусного расстояния осуществляется путем перемещения второй группы по линейному закону, максимальное перемещение составляет  $\Delta_2 = -8,62$  мм. Линейное увеличение второй группы изменяется от  $\beta_2 = -0,4$  (при  $f' = f'_{\min}$ ) до  $\beta_2 = -1,0$  (при  $f' = f'_{\max}$ ). Первая группа перемещается в сторону плоскости изображения по нелинейному закону, максимальное перемещение составляет  $\Delta_1 = 13,04$  мм. Aberrации рассчитаны с учетом расположения в фокальной плоскости плоскопараллельной пластины, суммарная толщина которой равна толщине фильтров, устанавливаемых перед ПЗС-матрицей. Апертурная диафрагма неподвижна и установлена в воздушном промежутке между первой и второй группами так, чтобы ход главного луча даже при приближении второй группы к ней был близким к телецентрическому. Объектив имеет максимальную длину при коротком фокусном расстоянии, суммарная толщина объектива в нерабочем состоянии составляет 35,1 мм, что характерно для цифровых камер данного временного периода. Другой вариант объектива (см. таблицу, вариант [2], пример 9) отличается конструкцией второй группы, которая включает четыре линзы. Упрощение достигнуто за счет введения еще одной асферики высшего порядка на первой поверхности второй группы, что позволило несколько сократить общую длину объектива.



**Рис. 3. Оптическая схема объектива USP6169635C**

Примером улучшения оптических характеристик (расширение угла поля) при одновременном сокращении габаритных размеров объектива за счет введения дополнительных асферических поверхностей и марок стекол с большим значением показателя преломления может служить объектив, заявленный фирмой Nikon (см. таблицу, вариант [3] пример 1). Оптическая схема объектива представлена на рис. 4. Как видно на рисунке, структурно объектив относится к типу



**Рис. 4. Оптическая схема объектива USP 2008/0198463A1**

В, соотношение фокусных расстояний  $K = -1,46$  ( $f_1' = -13,36$  мм,  $f_2' = 9,15$  мм). Первая группа включает две линзы, вторая поверхность отрицательной линзы асферической формы (эллиптическая поверхность высокого порядка). Обе линзы выполнены из стекол с высоким значением показателя преломления и различным значением коэффициента Аббе ( $n_2 = 1,8361$ ,  $\nu_2 = 40,43$ ,  $n_4 = 1,8466$ ,  $\nu_4 = 23,78$ ). Вторая группа включает три линзы: первая поверхность отрицательной линзы асферическая (сплюснутый эллипс высокого порядка), последняя поверхность положительной линзы асферическая (гипербола высокого порядка). Значения показателей преломления подобраны таким образом, чтобы получить значение суммы Петцваля, близкое к нулю ( $S_{IV} = -0,01$ ), что позволило исправить кривизну поля для большого значения углового поля в пространстве предметов ( $2\omega = 71,9^\circ$ ). Аберрации для точки на оси хорошо исправлены путем введения асферической поверхности на первой поверхности отрицательной линзы второй группы. Аберрации для точки вне оси (астигматизм, дисторсия) исправлены путем введения асферических поверхностей на первой и последней линзах. Изменение фокусного расстояния обеспечивается перемещением второй группы по линейному закону на величину  $\Delta_2 = -7,19$  мм. Для сохранения неподвижной плоскости изображения первая группа перемещается по нелинейному закону. В объективе предусмотрена возможность перпендикулярного смещения второй группы с целью компенсации вибраций камеры. Конструктивная простота объектива, достигнутая в результате применения в качестве коррекционных параметров асферических поверхностей высокого порядка, позволяет получить очень малую суммарную толщину объектива в сложенном состоянии (в нерабочем по-

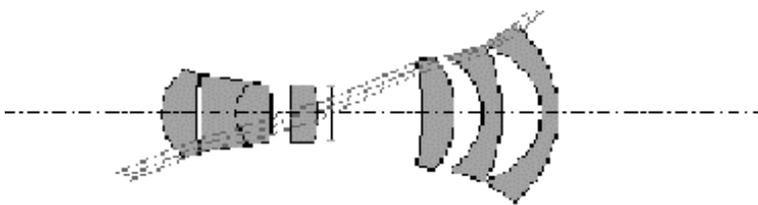
ложении). Это позволяет уменьшить толщину цифровой камеры и довести ее до размеров, которые ранее были достижимы только в случае применения объективов перископического типа.

Другой вариант объектива, заявленный фирмой Nikon в упомянутом выше патенте (см. таблицу, вариант [3] пример 2), рассчитан на меньшую диагональ кадра, имеет похожую оптическую схему, существенно большее угловое поле в пространстве предметов.

Сверхширокоугольный объектив фирмы Fujinon описан в работе [6], оптические характеристики приведены в таблице (вариант [6]). Структурно объектив относится к типу В, соотношение фокусных расстояний  $K = -0,8$  ( $f'_1 = -7,61$  мм,  $f'_2 = 9,44$  мм). Первая группа — трехлинзовая отрицательной силы. Первая линза этой группы — отрицательный мениск, обращенный выпуклой поверхностью к пространству предметов, вторая линза — двояковогнутая, третья — двояковыпуклая. Максимальное перемещение группы в сторону изображения составляет  $\Delta_1 = 9,0$  мм. Вторая группа — пятилинзовая, первая из них двояковыпуклая, обе поверхности асферической формы (асферика высшего порядка), второй элемент склеенный из двояковыпуклой линзы и отрицательного мениска, третья линза — отрицательный мениск, обращенный вогнутостью к изображению, четвертая линза — двояковыпуклая. Вторая группа перемещается по линейному закону в сторону пространства предметов, максимальное перемещение составляет  $\Delta_2 = -8,74$  мм. Линейно увеличение второй группы изменяется от  $\beta_2 = -0,37$  (при  $f' = f'_{\min}$ ) до  $\beta_2 = -1,3$  (при  $f' = f'_{\max}$ ). Апертурная диафрагма неподвижна и расположена между первой и второй группами. Объектив имеет максимальную длину  $L = 46,47$  мм при минимальном фокусном расстоянии. Высокие характеристики объектива достигнуты за счет применения асферических поверхностей высокого порядка и применения марок оптических стекол (кроновых и флинтowych) с высоким значением показателей преломления:  $n_d = 1,883$ ,  $\nu_d = 40,8$  — в первой и второй линзах,  $n_d = 1,923$ ,  $\nu_d = 18,9$  — в третьей, шестой и седьмой линзах.

Оптическая схема объектива фирмы Samsung [5] представлена на рис. 5, оптические характеристики объектива приведены в таблице (вариант [5]).

Структурно объектив относится к двухгрупповым объективам типа Б, отношение фокусных расстояний  $K = -1,66$  ( $f'_1 = 17,91$  мм,  $f'_2 = -10,80$  мм). Первая группа включает положительный мениск, обращенный выпуклостью к объекту, вторая поверхность мениска асферическая (сплюснутый эллипс высшего порядка), двояковогнутую линзу, вторая поверхность которой асферическая (эллипс высшего порядка), двояковыпуклую линзу и четвертую линзу в виде по-

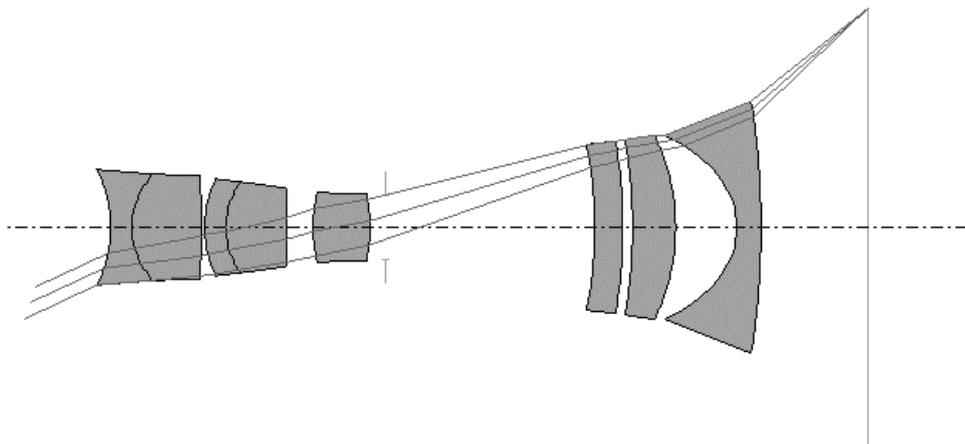


**Рис. 5. Оптическая схема объектива USP5995299**

положительного мениска, обращенного выпуклостью к изображению. Апертурная диафрагма размещена после первой группы и перемещается вместе с ней. Вторая группа включает три линзы: первая — положительный мениск, обращенный выпуклостью к изображению, у которого вторая поверхность асферическая (гипербола высшего порядка); вторая линза — отрицательный мениск, обращенный вогнутостью к предмету; третья линза — отрицательный мениск, обращенный выпуклостью к изображению. Обе группы перемещаются в сторону объекта, первая группа по нелинейному закону, а вторая группа по линейному закону. Увеличение второй группы изменяется от  $\beta_2 = 1,74$  (при  $f' = f'_{\min}$ ) до  $\beta_2 = 2,96$  (при  $f' = f'_{\max}$ ), максимальное перемещение второй группы составляет  $\Delta_2 = -13,57$  мм. Длина объектива изменяется от 27,15 до 37,48 мм. Несколько вариантов объектива, приведенных в упомянутом выше патенте, отличаются конструкцией групп и формами асферических поверхностей, а также местом их нанесения.

Оптическая схема широкоугольного объектива фирмы Olympus [8], предназначенного для фотокамер с диагональю кадра 43 мм, представлена на рис. 6, оптические характеристики приведены в таблице (вариант [8]). Структурно объектив относится к двухгрупповым объективам типа Б, отношение фокусных расстояний  $K = -1,03$  ( $f'_1 = 21,68$  мм,  $f'_2 = -21,13$  мм), при котором значение суммы Петцваля  $S_{IV} = -0,01$  при минимальном фокусном расстоянии. Первая группа включает: склеенный элемент из двояковыгнутой линзы и двояковыпуклой со стороны изображения, второй склеенный элемент из отрицательного мениска и двояковыпуклой линзы со стороны изображения, двояковыпуклую линзу, обе поверхности которой асферические (поверхности высшего порядка). Апертурная диафрагма расположена после первой группы и перемещается вместе с ней. Вторая группа включает отрицательный мениск, обращенный вогнутостью к объекту, его первая поверхность асферическая (гипербола высшего порядка); второй положительный мениск, обращенный выпуклостью к изображению; отрицательный мениск, обращенный вогнутостью к объекту. Обе группы перемещаются в сторону объекта, первая группа по нелинейному закону, а вторая группа — по линейному закону. Увеличение второй группы изменяется от  $\beta_2 = 1,38$  (при  $f' = f'_{\min}$ ) до  $\beta_2 = 4,9$

(при  $f' = f'_{\max}$ ), максимальное перемещение второй группы составляет  $\Delta_2 = -75,2$  мм, длина объектива изменяется от 47,2 до 110,9 мм. В данном патенте описаны несколько вариантов оптических схем с близкими оптическими характеристиками, имеющих аналогичную структуру, но отличающихся конструкцией первой или второй группы. В одном из вариантов вторая группа состоит из двух менисков — положительного и отрицательного, в другом варианте первая группа включает три одиночных и склеенный элемент.



**Рис. 6. Оптическая схема объектива USP6906869**

Таким образом, в работе рассмотрены структурные схемы двухгрупповых панкратических объективов, сформулирован подход к габаритному расчету такого рода объективов. Проведен анализ патентных материалов по двухгрупповым объективам, который показал актуальность использования двухгрупповой схемы для разработки широкоугольных панкратических объективов с небольшим перепадом фокусных расстояний

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1992. 448 с.
2. US Patent 6169635 G02b 15/14 2000.
3. US Patent Application Publication 2008/0198463 A1 G02b 15/14 2008.
4. US Patent Application Publication 2008/0252992 A1 G02b 15/14 2008.
5. US Patent 5995299 G02b 15/14 1999.
6. US Patent 7768718 B2 G02b 15/14 2010.
7. US Patent 6008953 B2 G02b 15/14 2000.
8. US Patent 6906869 B2 G02b 15/14 2005.

Статья поступила в редакцию 16.10.2012