ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКЦИОННЫХ СВОЙСТВ АПОХРОМАТОВ НА СТЕКЛАХ С НОРМАЛЬНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

A STUDY OF CORRECTIONAL PROPERTIES OF APO LENSES ON GLASSES WITH NORMAL DISPERSION

УДК 535.31

Дмитерко Руслан Алексеевич, Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ОПД, Московское высшее общевойсковое командное училище, Россия, г. Москва

Страхов Андрей Александрович, преподаватель кафедры ОПД, Московское высшее общевойсковое командное училище, Россия, г. Москва

Ruslan Alekseevich Dmyterko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of OPD, Moscow Higher Combined Arms Command School, Russia, Moscow

Strakhov Andrey Aleksandrovich, teacher of the Department of OPD, Moscow Higher Combined Arms Command School, Russia, Moscow

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы коррекции вторичного спектра объективов телескопических систем различного назначения с использованием стекол с нормальным ходом дисперсии. Выявлен ряд комбинаций стекол, которые позволяют создать схемы объективов с апохроматической коррекцией. Приведены примеры некоторых схем. Дан сравнительный анализ коррекционных возможностей таких схем в сравнении со схемами на фтор фосфатных кронах с особым ходом дисперсии.

Abstract: the article deals with the issues of correction of the secondary spectrum of lenses of telescopic systems for various purposes using glasses with a

normal dispersion. A number of combinations of glasses have been identified that allow creating lens schemes with apo correction. Examples of some schemes are given. A comparative analysis of the correction capabilities of such schemes in comparison with schemes on fluoro-phosphate ED crowns is given.

Ключевые слова: объектив, вторичный спектр, дисперсия, хроматизм положения, сферохроматизм.

Keywords: lens, secondary spectrum, dispersion, longitudinal chromatic aberration, spherochromatism.

В нашей статье [1], посвященной выбору оптических материалов с нормальным ходом дисперсии для объективов телескопических систем было определено некоторое количество совместимых оптических материалов для создания на их основе визуальных апохроматических объективов.

Задачей данной статьи является выявление наиболее оптимальных сочетаний оптических материалов с целью построения конструкций реальных объективов, в которых исправлены хроматизм положения, сферическая аберрация, кома и сферохроматизм.

Для детального исследования коррекционных возможностей различных вариантов построения объективов на базе таких материалов, в первую очередь определим наиболее предпочтительные комбинации стекол в объективе. Для этого рассчитаем относительные частные дисперсии всех стекол, попавших в перечень «перспективных». Относительные частные дисперсии $P_{x,y}$ рассчитываем по формулам:

$$P_{x,y}= n_x - n_y/n_F - n_C , \qquad (1)$$

где: $n_F - n_C$ – средняя дисперсия, т.е. разность показателей преломления стекла для синей линии излучения водорода F (486,1327нм) и красной линии излучения водорода C (656,2725нм);

n_x и n_y – показатели преломления для длин волн x и y, лежащих внутри спектрального диапазона F - C.

Расчетные данные сведены в таблицу 1. Там же приведены значения коэффициентов дисперсии ν_d для всех отобранных стекол. Коэффициенты дисперсии (числа Аббе) рассчитаны по формуле:

$$\nu_d = n_d - 1/n_F - n_C , \qquad (2)$$

где n_d – показатель преломления стекла для желтой линии излучения гелия d(587,5618нм).

В таблице 2 приведены некоторые «особые» кроны и флинты (ОК, ОФ и FPL). Эта информация понадобится нам для сравнения коррекционных возможностей вновь полученных комбинаций оптических материалов с уже известными комбинациями на базе материалов с особым ходом дисперсии.

Таблица 1

Числа Аббе и частные дисперсии «нормальных» стекол

№	Марка стекла	ν_d	$P_{F,d}$	$P_{g,F}$	$P_{d,C}$
1	S-NSL3	59,00	0,6962	0,5457	0.3038
2	СТК19	50,26	0,6972	0,5452	0.3028
3	К-20	60,17	0,6955	0,5420	0,3045
4	N-LAK10	50,62	0,6974	0,5515	0,3025
5	БК-6	59,61	0,6963	0,5429	0,3037
6	ТК-20	56,63	0,6973	0,5459	0,3027
7	S-PHM52	63,40	0,6962	0,5441	0,3037
8	S-BSM2	56,80	0,6974	0,5484	0,3026

Построим диаграмму Аббе для стекол, перечисленных в таблице 1.

На диаграмме (Рис.1) по оси абсцисс отложены числа Аббе, а по оси ординат – относительные частные дисперсии $P_{F,d}$. Прямая, изображенная на диаграмме является «нормальной» прямой и проходит через стекла Ф-13 и К-18 (отмечены красным цветом). Эта диаграмма поможет нам осуществить выбор комбинаций стекол для объективов.

Таблица 2

Числа Аббе и относительные частные дисперсии «особых» стекол

№	Марка стекла	ν_d	$P_{F,d}$	$P_{g,F}$	$P_{d,C}$
1	ОК-4	92,01	0,6926	0,5347	0,3073
2	S-FPL55	94,66	0,6932	0,5340	0,3067
3	ОФ-6	50,74	0,6957	0,5420	0,3042
4	ОФ-1	51,59	0,6975	0,5473	0,3024
5	ОФ-2	48,59	0,6995	0,5584	0,3004
6	ОФ-3	44,03	0,6995	0,5579	0,3004
7	ОФ-4	43,45	0,7003	0,5613	0,2996
8	ОФ-10	55,94	0,6937	0,5393	0,3062

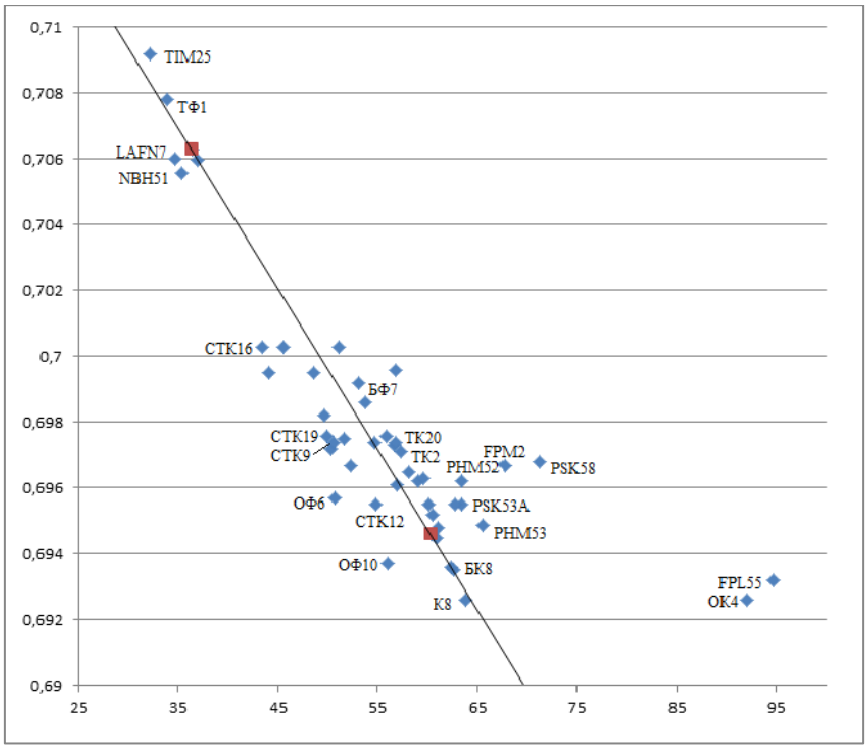


Рисунок 1 Диаграмма Аббе

Известно, что для лучшей коррекции хроматизма положения предпочтительно выбирать стекла с наименьшей разницей относительных частных дисперсий. Кроме того, для уменьшения сферохроматической аберрации, желательна максимальная разница в числах Аббе [2]. Таким образом, нам следует выбирать те стекла, которые расположены на диаграмме Аббе, по возможности, на одной высоте и как можно дальше друг от друга по горизонтали.

На диаграмме видны стекла, расположенные достаточно далеко от нормальной прямой, как слева от нее, так и справа (СТК-12 и N-PSM58). Есть и стекла, расположенные приблизительно на одной высоте, например, пары СТК-12 и N-PSK53, СТК-9 и ТК-20. Очевидно, что в качестве одного из стекол будущих объективов должно быть выбрано стекло марки СТК, предпочтительно СТК-9, СТК-19 и СТК-12, так как они расположены на наибольшем расстоянии слева от нормальной прямой, что обеспечит наибольшую разность в числах Аббе с комплементарной парой. Справа от нормальной прямой имеется достаточное количество стекол, расположенных на приблизительно равных со стеклами СТК высотах и на разных расстояниях по оси абсцисс.

В наших объективах предполагается использовать два оптических материала, но, одну из линз следует разделить на две составляющие с тем, чтобы распределить ее оптическую силу между ними. И тогда объектив будет представлять из себя дублет с одной расщепленной линзой. Такой подход был обоснован Максутовым Д.Д. в [2], поэтому, при оценке остаточного продольного хроматизма объектива будем пользоваться формулой для вторичного спектра дублета, приведенной в той же работе:

$$\Delta S_{Fd} = F_d \frac{\Delta P_{Fd}}{\Delta \nu_d}, \qquad (3)$$

где: ΔS_{Fd} – величина продольного вторичного спектра относительно фокуса F_d;

F_d – фокусное расстояние для линии d;

ΔP_{Fd} – разность относительных частных дисперсий P_{Fd} двух оптических материалов;

$\Delta \nu_d$ – разность чисел Аббе двух оптических материалов.

Для сравнения коррекционных возможностей объективов, построенных на базе выявленных нами оптических материалов с нормальным ходом дисперсии с возможностями аналогичных схем на базе особых стекол, авторами была составлена таблица 3, в которой приведены оптические

постоянные стекол, являющихся комплементарными к особому крону ОК-4. В таблице также представлены результаты расчета хроматизма положения.

Таблица 3

Возможные пары для стекла ОК-4

№	Марка стекла	$\Delta\nu_d$	$\Delta P_{(F,d)}$	$\Delta P_{(g,F)}$	ΔS_{Fd}, мм	ΔS_{gF}, мм
1	БК-8	29,59	-0,0010	0,0029	-0.034	0,098
2	К-8	28,17	≤-0,0001	0,0030	-0.004	0,106
3	ОФ-6	41,27	-0,0031	0,0073	-0.075	0,176
4	ТК-12	29,33	-0,0009	0,0015	-0.031	0,051
5	ТК-23	31,09	-0,0019	0,0016	-0,059	0.051
6	ОФ-10	36,07	-0,0011	0,0046	-0.030	0,127

Анализ данных таблиц 1 и 3 показывает, что при оптимальных сочетаниях оптических материалов уровень исправления хроматизма положения примерно одинаков для схем с использованием нормальных и особых стекол, как в диапазоне F-C, так и для диапазона g-C.

Для определения наилучшей схемы построения объективов из отобранных пар оптических материалов, выберем пары, для которых остаточный хроматизм положения минимален. Так, хорошие результаты дают пары СТК-9 - ТК-2, СТК-9 – БК-6, СТК-9 – N-PSK58 и СТК-9 –S-PHM52. Стекло СТК-12 хорошо сочетается со стеклами ТК-14 и БК-13. И, наконец, стекло СТК-19 хорошо сочетается с ТК-20, S-PHM52, N-PSK58 и S-FPM2.

Для всех выбранных пар схему дублета с одной расщепленной линзой можно строить двумя способами: одна линза из сверхтяжелого крона - две линзы из обычного крона или наоборот. Причем, нерасщепленная линза располагается в середине, а половинки расщепленной – по краям схемы. Например: ТК-2 – СТК-9 – ТК-2 или СТК-9 – ТК-2 – СТК-9. С точки зрения получения более комфортных условий для коррекции сферохроматизма и

сферической аберрации, необходимо получить схему с наименьшими оптическими силами линз, т.е. получить наименьшие кривизны поверхностей.

В варианте СТК-9 - ТК-2 - СТК-9 схема при оптимизации стремилась к конфигурации обращенного телеобъектива ($\varphi_I<0$), т.е. к конфигурации, самой невыгодной с точки зрения баланса аберраций [2]. Оптимизировался объектив с диаметром входного зрачка 100мм и относительным отверстием 1:10.

Суммарная кривизна двух поверхностей средней линзы, имеющей наибольшую оптическую силу, составила величину 13,96. Следствием большой кривизны поверхностей явился значительный сферохроматизм, который сводит на нет преимущества укороченного вторичного спектра. График продольных аберраций приведен на рис. 2. По оси абсцисс на графиках (рис. 2 - рис. 5) отложена величина заднего отрезка, а по оси ординат – зона зрачка, всё в мм.

Вариант ТК-2–СТК-9–ТК-2, как и ожидалось, показал лучшие результаты. Суммарная кривизна двух поверхностей средней линзы составила 9,56. Отношение F к ΔS_{FC} составило 11764 вместо 2000 в обычном ахромате. А сферохроматизм и хроматизм положения оказались сбалансированы (Рис. 3).

Еще лучшие результаты должна дать схема N-PSK58–СТК-9–N-PSK58, т.к. при тех же значениях $\Delta P_{(F,d)}$ и $\Delta P_{(g,F)}$ имеем существенно большую разность чисел Аббе. Данная схема также была оптимизирована в программе ZEMAX.

Суммарная кривизна поверхностей средней линзы составила всего 4,05, что положительно сказалось на величине сферохроматизма (Рис. 4).

Таким образом, предпочтительным оказался вариант, когда центральная линза имеет больший показатель преломления, а две крайние линзы – меньший.

Для сравнения результатов и коррекционных возможностей оптических схем на нормальных стеклах со схемами на особых стеклах, были рассчитаны объективы на особых стеклах, с теми же внешними характеристиками – фокусным расстоянием и относительным отверстием. Лучшие результаты из

комбинаций стекол на основе особых кронов показало стекло К-8. Был рассчитан объектив со следующей оптической схемой: К-8 – ОК-4 – К-8. Суммарная кривизна поверхностей средней линзы в системе К-8– ОК-4– К-8 составила 7,18.

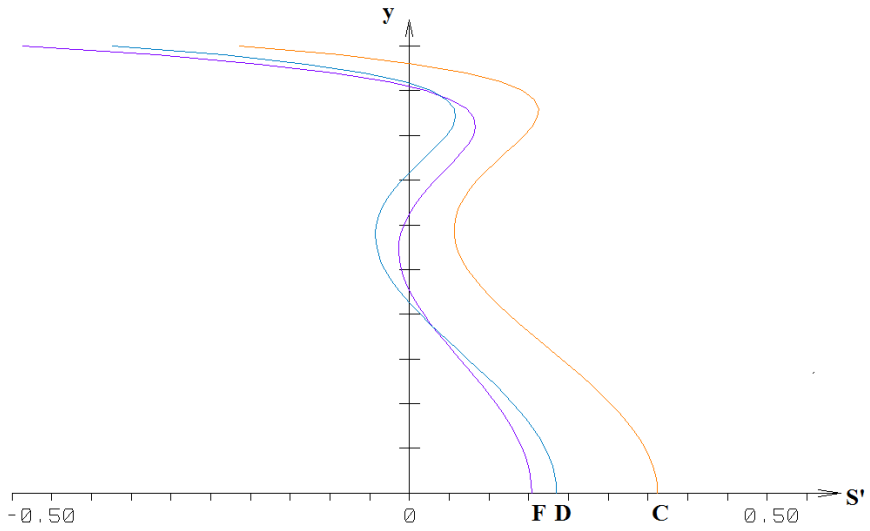


Рисунок 2 Продольные аберрации объектива СТК-9 - ТК-2, СТК-9

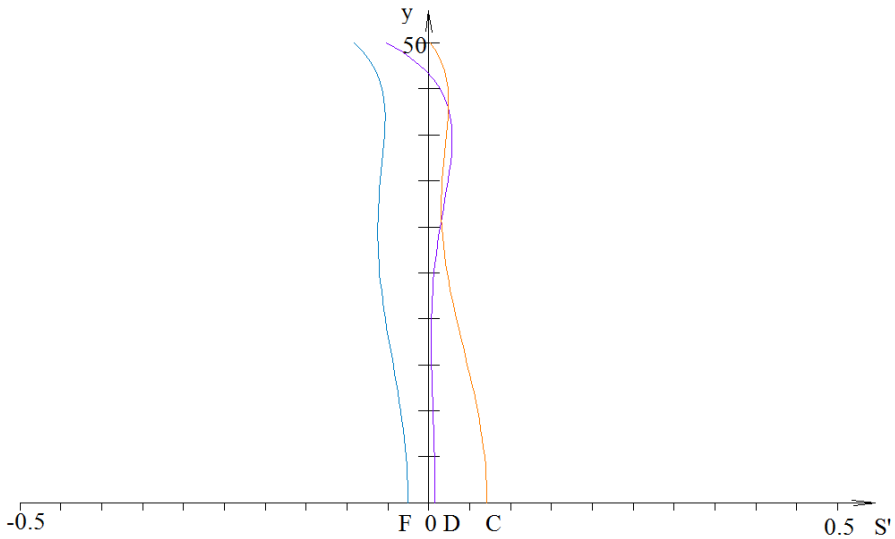


Рисунок 3 Продольные аберрации объектива ТК-2 – СТК-9 – ТК-2

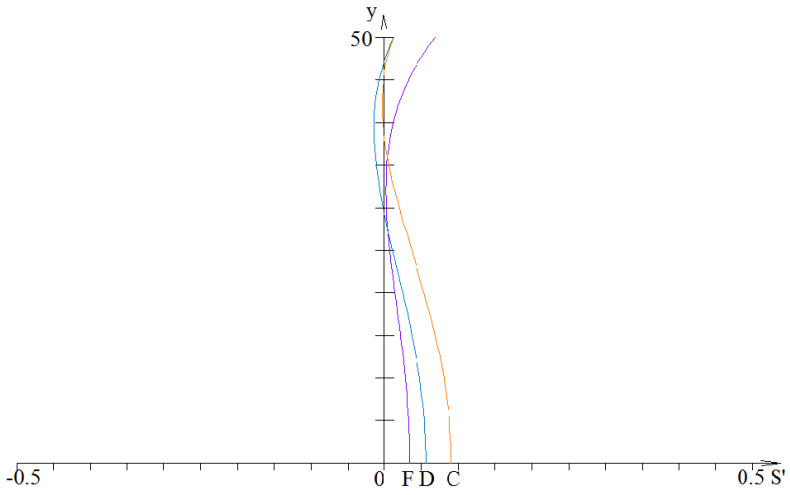


Рисунок 4 Продольные аберрации объектива N-PSK58 – СТК-9 – N-PSK58

График продольных аберраций для данной системы приведен на рис.5.

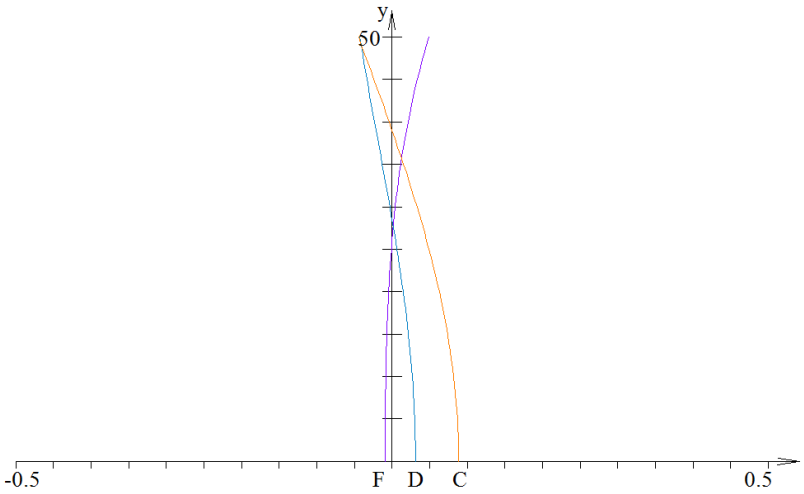


Рисунок 5 Продольные аберрации объектива К-8 –ОК-4 – К-8

Сравнивая графики рис.4 и рис.5, видим, что система на особых стеклах не имеет преимуществ в смысле коррекции хроматизма положения и сферохроматизма по сравнению с одной из предложенных нами системой на нормальных стеклах.

Что касается коррекции комы, то она исправлена безукоризненно для обоих объективов, а аберрацией, ограничивающей поле зрения объективов на уровне +/-1° является астигматизм.

Таким образом, авторами были найдены новые подходы к построению апохроматических объективов-апланатов на базе стекол с нормальным ходом дисперсии, рассчитаны их оптические схемы, показано, что они обладают

хорошим коррекционным потенциалом и, в этом смысле, не уступают потенциалу схем на базе более дорогостоящих и низко-технологичных особых стекол.

Список литературы

1. Дмитерко Р.А., Страхов А.А. Объективы телескопических систем с исправленным вторичным спектром. // Colloquium-Journal.–2020. –№8(60),– С. 19-23.
2. Максутов Д.Д. Астрономическая оптика. Л., Наука, 1979, 395с.
3. ZEMAX 13 R2 SP4x64. Optical Design Program. 2013.

List of references

1. Dmyterko R.A., Strakhov A.A. Lenses of telescopic systems with a corrected secondary spectrum. // Colloquium-Journal. –2020. –№8 (60), - P. 19-23.
2. Maksutov D.D. Astronomical optics. L., Science, 1979, 395s.
3. ZEMAX 13 R2 SP4x64. Optical Design Program. 2013.