

Схемные решения для построения панкратических зрительных труб

Н. И. Колмогорцев¹, Т. Н. Хацевич¹*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: Nikol-98@bk.ru

Аннотация. Совершенствование классических зрительных труб, предназначенных для наблюдения за удаленными объектами, в настоящее время связано с обеспечением в них режимов работы со сменным увеличением и возможностью фото-видеофиксации. Целью исследования является предложение схемных решений оптических систем панкратических зрительных труб большого увеличения и обоснование возможности их использования для инженерных разработок. Исследование базируется на инженерном проектировании двух вариантов оптических систем зрительной трубы с увеличением от 20 до 60 крат, в первом из которых панкратическая смена увеличения обеспечивается подвижками компонентов в окулярной части, во втором – в объективной части. Рассмотрены характеристики панкратических зрительных труб. Выявлено, что в современных моделях панкратическая смена увеличений осуществляется в окулярной и объективной частях системы. Методами компьютерного моделирования произведен синтез в параксиальном приближении оптических схем с последующей реализацией систем с конечными апертурами и толщинами. Разработанные системы могут представлять интерес для отечественных предприятий оптического приборостроения.

Ключевые слова: зрительные трубы, увеличение, оптическая система, панкратическая смена увеличения, объектив, окуляр

Circuit designs for construction of pancratic telescopes

N. I. Kolmogorcev¹, T. N. Khatsevich¹*

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: Nikol-98@bk.ru

Abstract. The improvement of classical telescopes designed to observe distant objects is currently associated with the provision of operating modes with interchangeable magnification and the possibility of photo and video recording. The purpose of the paper is to propose circuit designs for optical systems of high-magnification pancratic telescopes and substantiate the possibility of their use in engineering. The paper is based on the engineering design of two variants of telescope optical systems with a magnification of 20 to 60 times, in the first of which the pancratic change of magnification is provided by the movements of the components in the ocular part, in the second – in the objective part. The characteristics of pancratic telescopes are considered. It was revealed that in modern models the pancratic change of magnifications is carried out in the ocular and objective parts of the system. Computer simulation methods were used to synthesize optical schemes in the paraxial approximation, followed by the implementation of systems with finite apertures and thicknesses. The developed systems can be used at domestic enterprises of optical instrumentation.

Keywords: telescopes, magnification, optical system, pancratic change of magnification, pancratic lens, pancratic eyepiece

Введение

Совершенствование классических зрительных труб, предназначенных для наблюдения за удаленными объектами, в настоящее время связано с обеспечением в них режимов работы со сменным увеличением и возможностью фото-видеофиксации [1].

Основные зрительные задачи, решаемые с помощью зрительных труб, – это обнаружение, распознавание и идентификация объектов [2]. Эти задачи не могут эффективно решаться при постоянном увеличении прибора. Для повышения эффективности решения зрительных задач требуется вести наблюдение при различных увеличениях и полях зрения. Этим обуславливается актуальность совершенствования оптических систем зрительных труб. Анализ характеристик зрительных труб, присутствующих на современном рынке (см., например, продукцию компаний «BARSKA» [3], «Celestron» [4], «ZEISS» [5] и «LEICA» [6]) позволяет выделить тенденции к повышению увеличений зрительных труб, применению панкратической смены увеличений и полей зрения, к наклону оптической оси окуляра относительно оси объектива, возможности применения поворотной окулярной части в конструкции приборов.

Цель исследования: предложить схемные решения оптических систем панкратических зрительных труб большого увеличения и обосновать возможность их использования для инженерных разработок.

Исследование базируется на инженерном проектировании двух вариантов оптических систем зрительной трубы с увеличением от 20 до 60 крат, в первом из которых панкратическая смена увеличения обеспечивается подвижками компонентов в окулярной части, во втором – в объективной части.

Методы исследования: компьютерные методы проектирования оптических систем, методы геометрической оптики.

Разработка панкратической зрительной трубы, смена увеличения в которой реализована в окулярной части

В статье рассматриваются два схемных решения:

- вариант 1: панкратическая система зрительной трубы со сменой увеличения, реализованной в окулярной части;
- вариант 2: панкратическая система зрительной трубы со сменой увеличения, реализованной в объективной части.

Оба варианта направлены на создание панкратической зрительной трубы с увеличением от 20 до 60 крат.

Для разработки варианта 1 панкратической системы зрительной трубы была использована следующая последовательность действий. На первом этапе выполняется разработка объектива. Объектив предлагается выполнять по схеме телеобъектива, отрицательный компонент которого используется для внутренней фокусировки на конечное расстояние до объектов и одновременно способствует уменьшению длины объектива. Особенность разработки оптической системы

длиннофокусного объектива для зрительной трубы большого увеличения заключается в тщательной коррекции хроматических aberrаций положения и увеличения, вторичного спектра и сферохроматической aberrации, оказывающих значительное влияние на визуальное качество изображения [7].

Основной этап заключается в выборе схемного решения для панкратической смены фокусного расстояния окулярной части. Схемное решение основано на использовании осевых подвижек двух внутренних линзовых компонентов 3, 5 (рис. 1) при неподвижных внешних компонентах 2, 6. Поскольку такое схемное решение предполагает, что передний фокус окуляра будет мнимым, то моделирование осуществляется при включении в расчет отрицательного компонента 1 объектива. В силу изменения положения передней фокальной плоскости компонентов 5, 6 полевая диафрагма 4 также перемещается вдоль оптической оси.

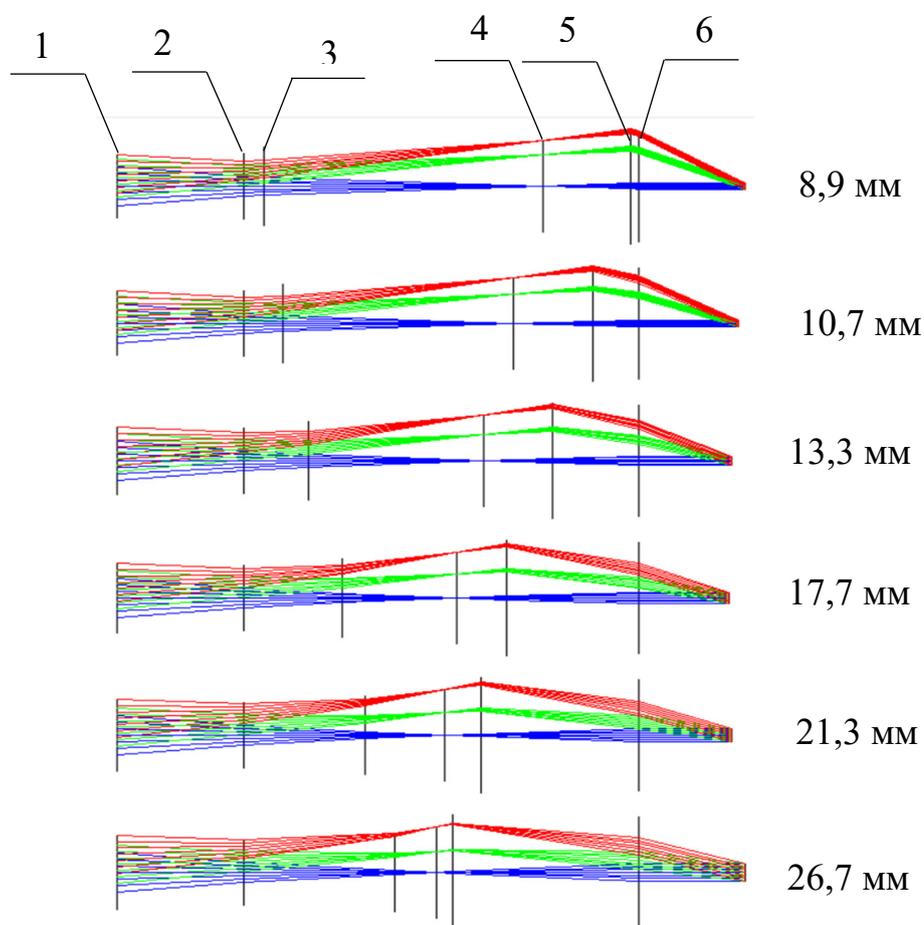


Рис. 1. Схема панкратического окуляра для варианта 1

Поиск параметров компонентов осуществляется методами компьютерного моделирования в параксиальном приближении и позволяет определить множество решений. Выбор решения для дальнейшего перехода к конечным толщинам и апертурам является эвристической процедурой и осуществляется на основании

анализа относительных отверстий и габаритных ограничений. Так, компоненты схемы, приведенной на рис. 1, имеют следующие параметры: фокусные расстояния компонентов 2, 3, 5 и 6 составляют минус 160; минус 45; 45 и 80 мм, соответственно. Отношение угловых полей в пространстве предметов в первой и последней конфигурациях различается в 1,7 раза

При переходе к конечным апертурам и толщинам количество линз в каждом компоненте моделируется от одной до трех в зависимости от относительного отверстия компонента, а также его фокусного расстояния. Дальнейшая оптимизация оптической системы проводится методом наименьших квадратов с активным демпфированием [8]. Данный алгоритм минимизирует заданную целевую функцию оптимизации, содержащую взвешенные значения целевых параметров оптической системы [9]. В качестве переменных параметров используются значения кривизны поверхности, толщины линз и воздушных промежутков, марки стекол, значения коэффициентов асферических поверхностей. Вариант 1 оптической системы зрительной трубы с увеличением от 20 до 60 крат, смена которого осуществляется в окулярной части, приведен на рис. 2, на котором показаны и траектории перемещений подвижных компонентов схемы.

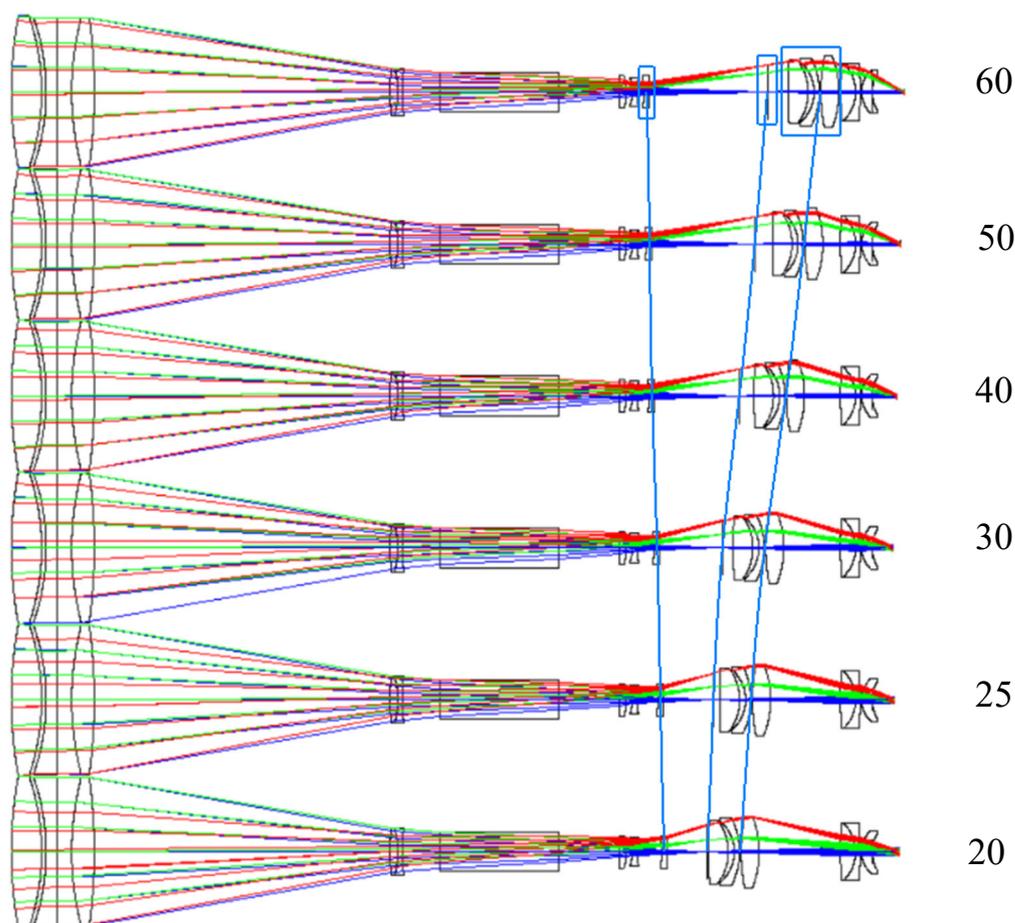


Рис. 2. Вариант 1 оптической системы панкратической зрительной трубы

Оптические силы компонентов 1–4, отнесенные к наибольшему фокусному расстоянию окуляра, после перевода на конечные апертуры и толщины относятся как $\varphi_1 : \varphi_2 : \varphi_3 : \varphi_4 = (-0,17) : (-0,6) : 0,6 : 0,31$, и соответствуют аналогичным значениям в параксиальной модели окуляра с отклонением не более 5 %.

Замена в расчетной модели плоскопараллельной пластинки на призму ВкР-45 (рис. 3) позволяет провести трассировку лучей в режиме непоследовательных компонентов и оценить габаритные размеры, массу системы, виньетирование наклонных пучков в каждом из положений [11].

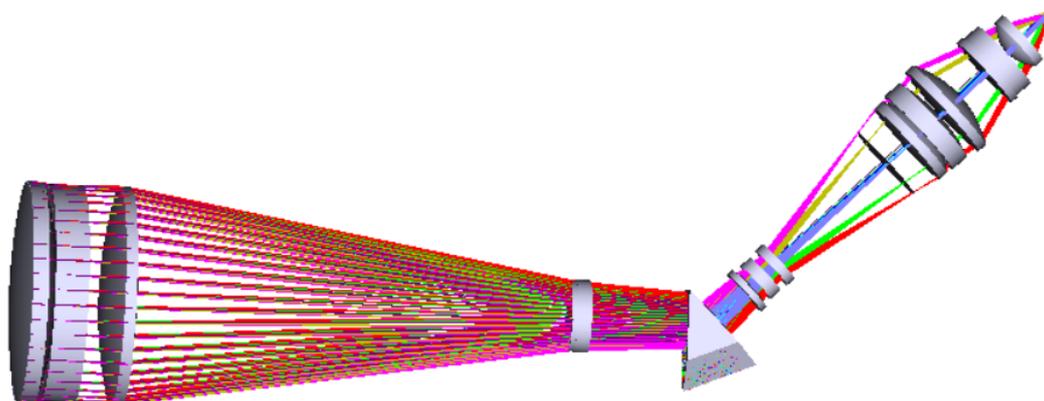


Рис. 3. Объемная модель оптической системы. Вариант 1. Увеличение 60 крат

Оптическая система обеспечивает смену увеличения с 20 до 60 крат, имеет диаметр объектива 100 мм, габаритные размеры 455x195 мм. Угол поля зрения при смене увеличения меняется от 1,8 до 1°. В составе оптической системы имеется 14 линз, в том числе три двухлинзовых склейки, две асферических поверхности, и одна призма. Масса оптических деталей 1,2 кг. Марки стекол соответствуют каталогу стекла, выпускаемому российским предприятием ЛЗОС [12].

Разработка панкратической зрительной трубы, смена увеличения в которой реализована в объективной части

Для разработки варианта 2 оптической системы зрительной трубы предлагается схемное решение, в котором и смена фокусного расстояния, и фокусировка на конечное расстояние до объектов осуществляется компонентами объектива. Минимальное количество компонентов в объективе принято равным трем (рис. 4), при этом внешний компонент 1 предполагается неподвижным, перемещения внутренних компонентов 2 и 3 используются для смены фокусного расстояния, фокусировка на конечное расстояние осуществляется дополнительным перемещением компонента 3. Для обеспечения диапазона увеличений зрительной трубы от 20 до 60 крат при фокусном расстоянии окуляра, рав-

ном 15 мм, фокусное расстояние в объективе должно меняться от 300 до 900 мм. Использование принципа телеобъектива позволяет найти приемлемое по относительным значениям компонентов решение в параксиальной модели, при котором относительные оптические силы компонентов 1–3 соотносятся как $\varphi_1 : \varphi_2 : \varphi_3 = 4,2 : (-25,7) : 10,5$. При этом диапазон перемещений компонента 2 составляет 8 мм, компонента 3 – 77 мм, дополнительная подвижка компонента 3 для фокусировки на расстояние до 10 м – 55 мм. На рис. 4 справа от схем указаны соответствующие значения фокусных расстояний объектива.

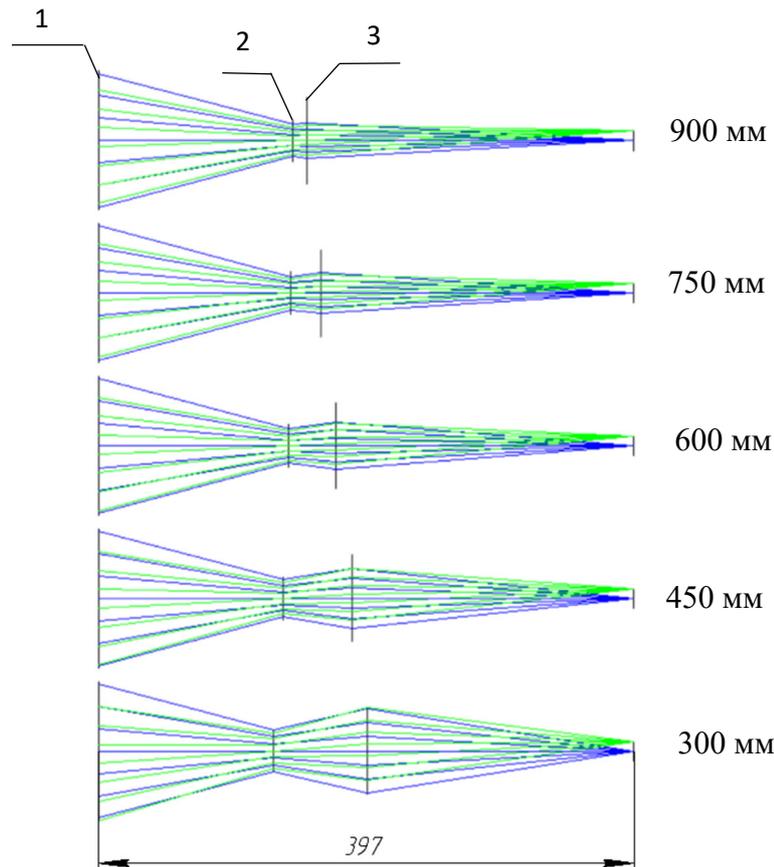


Рис. 4. Схема панхроматического объектива для варианта 2

Особенностью перехода от параксиальной модели объектива к конечным апертурам и толщинам является то, что компьютерное моделирование осуществляется в мультikonфигурационном режиме, включающем контроль качества изображения не только при различных фокусных расстояниях объектива, но и при различных расстояниях до объектов.

Для варианта 2 зрительной трубы был создан короткофокусный окуляр с фокусным расстоянием 15 мм, удалением выходного зрачка 20 мм и угловым полем 45° , схема которого в обратном ходе лучей представлена на рис. 5.

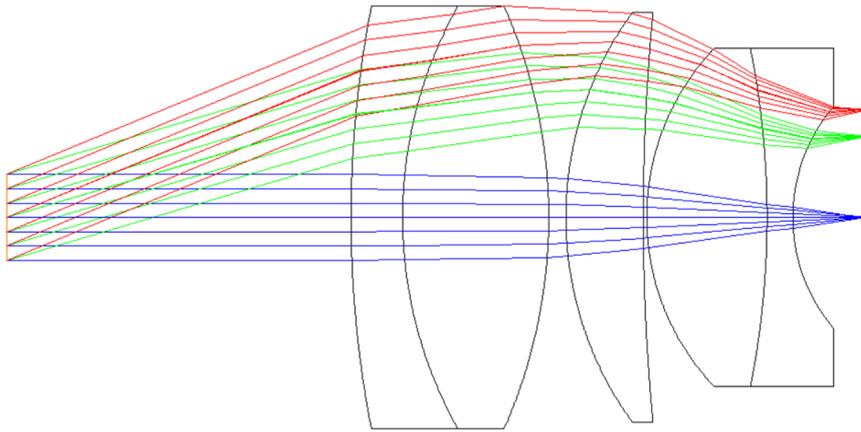


Рис. 5. Оптическая система окуляра для варианта 2

Угловое поле окуляра составляет 45° , что позволяет в варианте 2 оптической системы зрительной трубы (рис. 6) обеспечить трехкратный перепад угловых полей в пространстве предметов.

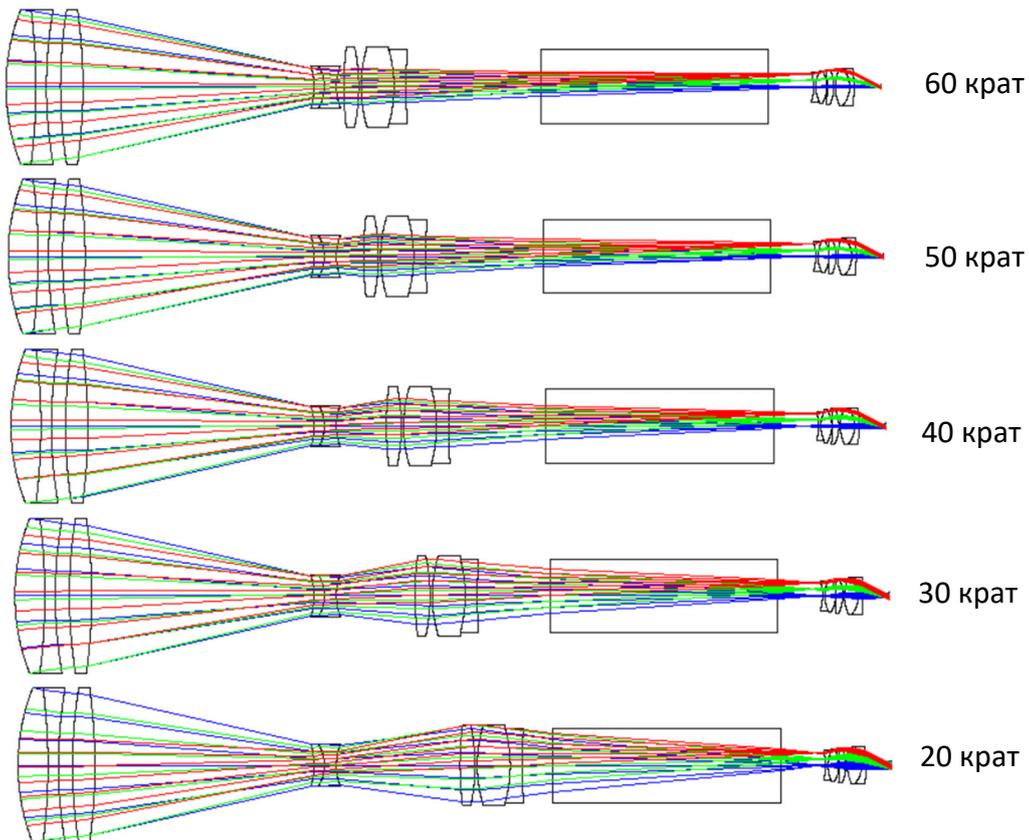


Рис. 6. Вариант 2 оптической системы панкратической зрительной трубы

В варианте 2 требуется призма ВкР-45 с большими габаритными размерами и массой, что иллюстрируется рис. 7 с ходом лучей при положении элементов схемы, соответствующих увеличению 20 крат.

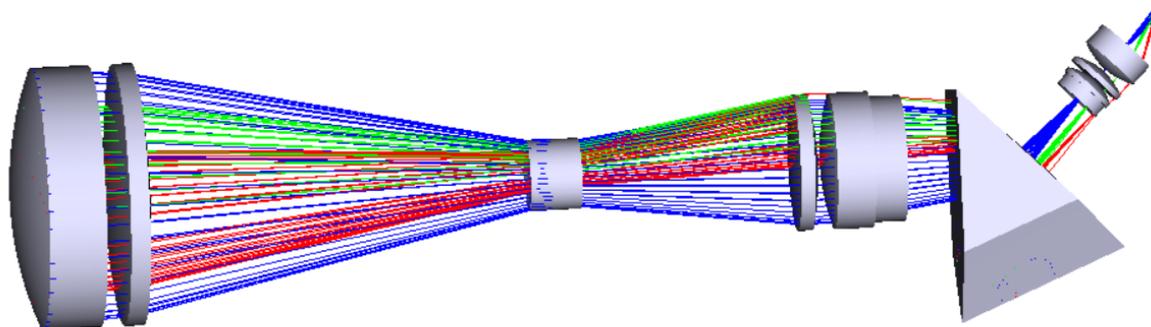


Рис. 7. Объемная модель оптической системы. Вариант 2. Увеличение 20 крат

В оптической системе, приведенной на рис. 7, относительные оптические силы компонентов окуляра, приведенные к наибольшему фокусному расстоянию объектива, составляют $\varphi_1 : \varphi_2 : \varphi_3 = (3,86) : (-25,8) : 10,5$, и незначительно изменились по сравнению с параксиальной моделью.

Итак, оптическая система по варианту 2 обеспечивает смену увеличения с 20 до 60 крат, имеет диаметр объектива 100 мм, габаритные размеры 422x115 мм. Угол поля зрения при смене увеличения меняется от 2,7 до 0,9°. В составе оптической системы имеется 13 линз, в том числе 5 двухлинзовых склеек, 2 асферических поверхности и одна призма. Масса оптических деталей 1,4 кг. Марки стекла соответствуют каталогу стекла, выпускаемому российским предприятием ЛЗОС.

Обсуждение

Разработанные оптические системы панкратических зрительных труб, схемы которых приведены на рис. 2 и 6, имеют равные диапазоны изменения увеличений, диаметры объективов, наименьшие расстояния фокусировки, количество асферических поверхностей в оптических системах. Отличия в таких показателях разработанных оптических систем как габаритные размеры, масса, количество линз оказались не более 15 %. При этом в варианте 2 перепады увеличений и полей зрения составляют 3 крата, в варианте 1 поле при увеличении 60 крат превышает поле при увеличении 20 крат в 1,8 раза.

Для сравнения качества изображения в полученных вариантах на рис. 8 и 9 приведены зависимости полихроматических среднеквадратических значений (СКЗ) пятен рассеяния в изображении точки за окуляром системы от поля зрения для различных увеличений. При этом по оси абсцисс угол поля зрения отложен в относительных единицах для пяти конфигураций (60, 50, 40, 30 и 20 крат).

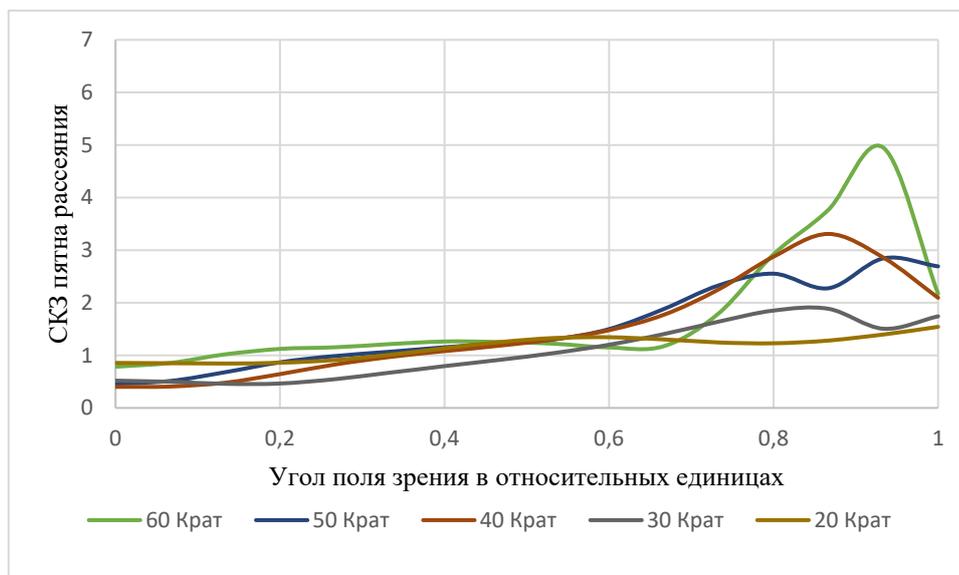


Рис. 8. Вариант 1. График СКЗ пятна рассеяния по полю для пяти конфигураций

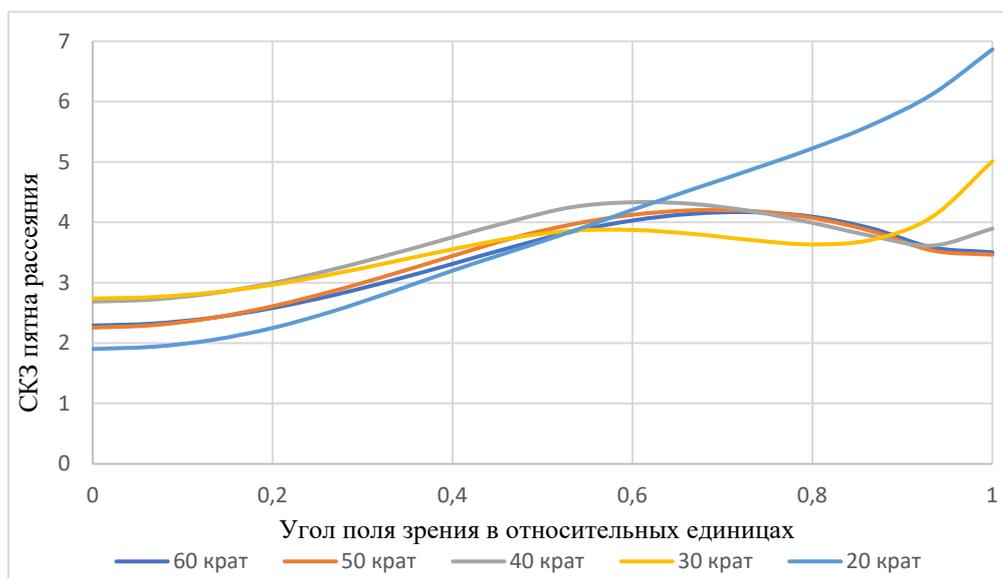


Рис. 9. Вариант 2. График СКЗ пятна рассеяния по полю для пяти конфигураций

В соответствии с существующими инженерными критериями оценки качества телескопических наблюдательных систем можно считать приемлемым качество изображения, формируемое как системой варианта 1, так и варианта 2. При этом в системе 1 обеспечено более высокое качество изображения в номинальном положении элементов. Расчет допусков на изготовление и сборку, выполненный для каждого из вариантов, показал более жесткие допуски в варианте 1. На основании этого можно предположить примерно равные качества изображений в двух вариантах после их изготовления и сборки.

Заключение

В заключение отмечаются следующие результаты:

- разработка зрительных труб с панкратической сменой увеличения соответствует тенденциям развития этой группы приборов;
- приводятся результаты расчета двух вариантов оптических систем зрительных труб с увеличениями от 20 до 60 крат, диаметром входного зрачка 100 мм, в первом из которых предусматривается панкратическая окулярная часть, во втором – панкратическая смена увеличения осуществляется подвижками компонентов объектива. В каждом из вариантов обеспечивается внутренняя фокусировка на объекты, расположенные на конечном расстоянии. Оба варианта доведены до уровня инженерных разработок, выполнены расчеты допусков, комплект технической документации на оптические системы. Инженерные разработки показали, что в каждом из вариантов приемлемое качество изображения достигается практически при одинаковом количестве линз и сопоставимых габаритных размерах. Поле зрения при наименьшем увеличении в варианте 2 с панкратическим объективом превышает поле зрения при аналогичном увеличении в варианте 1 примерно в 1,5 раза. Вариант с панкратическим окуляром имеет большее количество подвижных компонентов из-за необходимости перемещения полевой диафрагмы для обеспечения резких границ поля зрения. На выбор варианта для реализации могут повлиять технологические особенности конкретного предприятия.

Разработанные системы могут представлять интерес для отечественных предприятий оптического приборостроения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации от образовательного фонда «Талант и успех» в рамках договора № 423-М от 30.12.2020.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хацевич Т. Н., Колмогорцев Н. И. Зрительная труба большого увеличения в военной оптике // Калашниковские чтения: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции – Ижевск, 2020. – С. 138–141.
2. Колмогорцев Н. И., Хацевич Т.Н. Зрительные трубы переменного увеличения // Интерэкспо Гео-Сибирь. Международная научная конференция Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». – Новосибирск, 2021. – Т. 6. – С. 155–161.
3. Celestron Ultima [Электронный ресурс]. – URL: <http://celestron.ru/products/ultima-spotting-scopes/> (дата обращения: 10.04.2022).
4. LEICA зрительные трубы [Электронный ресурс].– URL: <https://store.leica-camera.com/ru/ru/zritelnye-truby/> (дата обращения: 10.04.2022).
5. Precision spotting scopes by barska [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.barska.com/optics-spotting-scopes/> (дата обращения: 10.04.2022).
6. ZEISS [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.zeiss.ru/consumer-products/nature-observation.html/> (дата обращения: 10.04.2022).

7. Запрягаева, Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем – Текст: непосредственный // Москва: Логос, 2000. – 584 с.
8. ZEMAX [Электронный ресурс] – URL: <https://www.zemax.com/> (дата обращения: 10.04.2022).
9. Хацевич Т. Н. Компьютерные методы проектирования оптических систем: учебник – Текст: непосредственный / Новосибирск: СГУГиТ, 2022. – 156 с.
10. Панов В. А., Кругер М. Я., Кулагин В. В. Справочник конструктора оптико-механических приборов – Текст: непосредственный // Машиностроение Ленинград. Отделение, 1980. – 742 с.
11. Ижбульдин Д. А., Колмогорцев Н. И., Шмелев Е. В. Проверка хода лучей в призмённых системах с использованием твердотельных моделей // Инженерная графика и трехмерное моделирование: сборник научных докладов – Новосибирск, 2021. – С. 88–92.
12. ЛЗОС [Электронный ресурс]. – URL: <http://lzos.ru/press-zentr/materials/catalog-opticheskogo-stekla/> (дата обращения: 10.04.2022).

© Н. И. Колмогорцев, Т. Н. Хацевич, 2022