

На правах рукописи
УДК 535.317.227; 681.7.067.254

ПРУНЕНКО ЮЛИЯ КОНСТАНТИНОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ И КОМПОЗИЦИЯ АНАМОРФОТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ДЛЯ ЦИФРОВОГО КИНЕМАТОГРАФА**

Специальность: 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2010

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Андреев Лев Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Губанова Людмила Александровна
кандидат технических наук, с.н.с.
Багдасаров Александр Аванесович

Ведущая организация: ОАО «ЛОМО»

Защита состоится “15” июня 2010 г. в 17 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 190000, г. Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д. 14, ауд. 313 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики

Автореферат разослан “13” мая 2010 г.

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим направлять в адрес университета:

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, секретарю диссертационного совета Д 212.227.01

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.227.01,
кандидат технических наук, доцент

Красавцев В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

С середины прошлого века в России и за рубежом широкое развитие получили анаморфотные оптические системы для широкоэкранный кинематографа, которые позволяют осуществлять съемку и проекцию широкоэкранных фильмов, используя обычную киноплёнку без замены имеющегося оборудования.

Использование цифровых технологий записи, обработки и воспроизведения изображений в области традиционного кино привело к созданию цифрового кинематографа. Начиная с 2005 года, ведется разработка систем цифрового кинематографа.

Анализ литературных данных показал, что на данный момент в цифровом кинематографе не существует единого оптического комплекса полного кинематографического процесса, что связано с применением гибридных цифро-плёночных и плёночно-цифровых систем кинематографа. Под оптическим комплексом понимается киносъёмочная и кинопроекционная оптика, так как остальные этапы кинематографического процесса обеспечиваются электронными средствами.

До недавнего времени разработке оптического комплекса мешало отсутствие светочувствительных и модулирующих матриц высокого разрешения (не менее 2048/1080 пикселей по горизонтали и вертикали матрицы соответственно). Появление таких матриц позволяет ставить задачу разработки оптического комплекса цифрового кинематографа. Вследствие этого актуальной является задача исследования и композиции анаморфотных оптических систем для широкоэкранный цифрового кинематографа.

Вопросы теории и практики проектирования анаморфотных оптических систем получили развитие в трудах Д. С. Волосова и Ш. Я. Печатниковой, Г. Г. Слюсарева, В. Н. Чуриловского, М. М. Русинова, Б. Н. Бегунова, В. А. Зверева, А. В. Гитина, А. А. Лапаури, Ф. С. Новика, Е. Abbe, Н. Chretien, Н. Köhler, К. Bruder, J. C. Burfoot, С. G. Wynne, W. Lessing, G. H. Cook, P. J. Sands, I. Powell, S. Yuan, J. M. Sasian и др.

Разработка оптических систем, удовлетворяющих современным условиям применения, требует обстоятельного анализа элементной базы и базовых схем, формирующих основу композиции анаморфотных оптических систем.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка теоретических основ композиции анаморфотных оптических систем для цифрового кинематографа и исследование их возможных вариантов.

Задачи исследования

1. Классификация оптических поверхностей, обладающих свойством анаморфирования, и анализ их абберрационных свойств.
2. Анализ оптических базовых схем анаморфотных систем.

3. Разработка методики расчета основных характеристик компонентов для полного цифрового кинематографического процесса.
4. Исследование габаритных соотношений анаморфотных сфероцилиндрических объективов.
5. Синтез и исследование киносъемочных анаморфотных объективов, состоящих из сферических, цилиндрических и торических поверхностей.
6. Синтез и исследование проекционных анаморфотных объективов, состоящих из сферических, цилиндрических и торических поверхностей.

Методы исследования

1. Анализ и обобщение данных по оптическим поверхностям и конструкциям анаморфотных оптических систем, используемых в кинематографе.
2. Аналитические методы, основанные на применении теории геометрической оптики.
3. Численные методы определения выходных характеристик исследуемых оптических систем.
4. Компьютерные методы моделирования работы оптических систем с применением современных программ расчета оптики.
5. Методы оптимизации конструктивных параметров оптических систем по критериям качества изображения.

Научная новизна работы

1. Разработана оптимальная методика расчета основных характеристик компонентов оптического комплекса для цифрового кинематографа.
2. Разработаны новые методики габаритного расчета киносъемочных и проекционных анаморфотных объективов с параллельными и перпендикулярными образующими цилиндрических компонентов при заданном коэффициенте анаморфозы, длине системы и заднем отрезке.
3. Исследованы и рассчитаны варианты новых малогабаритных киносъемочных и проекционных анаморфотных объективов для цифрового кинематографа.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Методика расчета основных характеристик компонентов оптического комплекса для цифрового кинематографа.
2. Методики габаритного расчета киносъемочных и проекционных анаморфотных объективов с параллельными образующими цилиндрических компонентов при заданном коэффициенте анаморфозы, длине системы и заднем отрезке.
3. Методики габаритного расчета киносъемочных и проекционных анаморфотных объективов с перпендикулярными образующими цилиндрических компонентов при заданном коэффициенте анаморфозы, длине системы и заднем отрезке.
4. Варианты новых малогабаритных киносъемочных и проекционных анаморфотных объективов для цифрового кинематографа.

Практическая ценность работы

1. Методика расчета основных характеристик может быть использована при разработке киносъёмочных и проекционных объективов для цифрового кинематографа.
2. Предложенные методики габаритного расчета могут использоваться при разработке анаморфотных оптических систем.
3. Рассчитаны оптические системы новых малогабаритных киносъёмочных и проекционных анаморфотных объективов для цифрового кинематографа.

Апробация работы

Основные результаты работы представлялись на IV межвузовской конференции молодых ученых (10–13 апреля 2007 года, Санкт-Петербург), V международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2007» (15–19 октября 2007 года, Санкт-Петербург), V Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (15–18 апреля 2008 года, Санкт-Петербург), международной конференции «Прикладная оптика – 2008» (20–24 октября, Санкт-Петербург), VI Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых (14–17 апреля 2009 года, Санкт-Петербург) и VI международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2009» (19–23 октября 2009 года, Санкт-Петербург).

Проводимые исследования поддержаны индивидуальным грантом комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга в 2008 году.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ (из них 1 в издании из перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ).

Личный вклад автора

Непосредственно автором проведены теоретические исследования, выполнены исследования оптических схем анаморфотных систем и рассчитаны варианты новых малогабаритных анаморфотных объективов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 270 наименований и 4 приложений, содержит 145 страниц основного текста, 60 рисунков и 6 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цель и задачи исследования, отмечаются научная новизна и практическая значимость результатов, перечисляются основные положения, выносимые на защиту. Приводится краткое содержание глав диссертационной работы.

В главе 1 рассмотрены преимущества цифрового кинематографа в сравнении с киноплёночным. Приведены главные положения концепции развития цифрового кинематографа. Выполнен обзор светочувствительных и светомодулирующих матриц, удовлетворяющих требованиям концепции цифрового кинематографа.

Дана краткая историческая справка о возникновении, развитии и применении трансформированного изображения. Выполнен обзор существующих анаморфотных оптических систем, применяемых в широкоэкранном кинематографе.

В концепции развития цифрового кинематографа, опубликованной в 2005 году ведущими киностудиями США и Японии, изложен ряд требований, в основном относящихся к качеству изображения, которое должно быть как минимум сопоставимо с качеством систем традиционного (35-миллиметрового киноплёночного) кинематографа или выше его. Предусматривается только два класса систем цифрового кинематографа, разрешение которых – 2К и 4К – соответствует числу активных пикселей светочувствительной матрицы камеры и модулирующей матрицы проектора по горизонтали и вертикали – 2048/1080, 4096/2160. Номинальные отношения сторон киноэкрана – 1,85:1 и 2,39:1. Частота смены кадров в системе 2К – 24 и 48 кадра в секунду, в системе 4К – 24 кадра в секунду.

Анализ литературных данных показал, что на данный момент не существует в довольно молодой области цифрового кинематографа единого оптического комплекса в полном кинематографическом процессе. Под оптическим комплексом понимается съёмочная и проекционная кинооптика. Остальные этапы цифрового кинематографического процесса обеспечиваются электронными средствами. Отсутствие единого оптического комплекса связано с применением в настоящее время гибридных цифро-плёночных и плёночно-цифровых систем кинематографа, где в основном применяется оптика для 35-мм плёнки. Анализ характеристик светочувствительных и модулирующих матриц показал, что на сегодняшний день появились матрицы, удовлетворяющие требованиям систем цифрового кинематографа 2К и 4К. Поэтому работа посвящена исследованию и композиции анаморфотных оптических систем для цифрового кинематографа.

В главе 2 рассмотрены варианты математического описания поверхностей, обладающих свойством анаморфирования и теория aberrаций третьего порядка поверхностей и оптических систем, имеющие две плоскости симметрии.

При проектировании анаморфотных систем может использоваться несколько типов поверхностей, имеющих две плоскости симметрии: цилиндрические, торические, эллипсоидальные и сфероцилиндрические, при этом каждая из них имеет разные уравнения поверхности. По формированию параксиального изображения эти поверхности подобны. Однако, aberrационная функция разных типов анаморфирующих поверхностей содержит различный набор коэффициентов aberrаций.

В параксиальном приближении каждый элемент анаморфотной системы может быть описан не только аналитически, но и с помощью матричной теории, которая использует матрицы 4×4 .

Уравнение aberrаций третьего порядка луча при прохождении через торическую поверхность описывается:

$$\begin{aligned}
-2\eta'\delta\eta'u'_y &= S_{1y}Y^3 + 3S_{2y}Y^2\eta + (3S_{3y} + S_{4y}) \cdot Y\eta^2 + S_{5y}\eta^3 + S_{2z\eta}Z^2\eta + 2S_{2y\xi}YZ\xi + \\
&+ S_{3y\xi}Y\xi^2 + S_{5y\xi}\eta\xi^2 + S_{1yz}YZ^2 + 2S_{3yz}Z\eta\xi, \\
-2n'\delta\xi'u'_z &= S_{1z}Z^3 + 3S_{2z}Z^2\xi + (3S_{3z} + S_{4z}) \cdot Z\xi^2 + S_{5z}\xi^3 + S_{2y\xi}Y^2\xi + 2S_{2z\eta}YZ\eta + \\
&+ S_{3z\eta}Z\eta^2 + S_{5z\eta}\xi\eta^2 + S_{1yz}Y^2Z + 2S_{3yz}Y\eta\xi,
\end{aligned} \tag{1}$$

где Y, Z – координаты в плоскости зрачка; η, ξ – координаты в плоскости предмета; $\delta\eta'$ и $\delta\xi'$ – проекции поперечной аберрации в плоскостях $\eta'OX$ и $\xi'OX$ соответственно; u'_y и u'_z – апертурные углы изображения в двух симметричных плоскостях.

В табл. 1 приведены члены уравнения, которые определяют основные монохроматические аберрации. Коэффициенты в первых двух строках табл. 1 могут быть записаны как коэффициенты Зейделя в двух плоскостях, если игнорировать нижние индексы. Остальные выражения в таблице называются перекрестными членами.

Табл. 1. Монохроматические аберрации торической поверхности и их коэффициенты

Сферическая аберрация	Кома	Астигматизм и кривизна изображения	Дисторсия
$S_{1y}Y^4/4;$ $S_{1z}Z^4/4;$ $S_{1yz}Y^2Z^2/2$	$S_{2y}Y^3\eta;$ $S_{2z}Z^3\xi;$ $S_{2y\xi}Y^2Z\xi;$ $S_{2z\eta}Z^2Y\eta$	$(S_{4y} + 3S_{3y})Y^2\eta^2/2;$ $(S_{4z} + 3S_{3z})Z^2\xi^2/2;$ $S_{3y\xi}Y^2\xi^2/2;$ $S_{3z\eta}Z^2\eta^2/2;$ $2S_{3yz}YZ\eta\xi$	$S_{5y}Y\eta^3;$ $S_{5z}Z\xi^3;$ $S_{5y}Y\eta\xi^2;$ $S_{5z\eta}Z\xi\eta^2$

Рассмотрены коэффициенты аберраций для двух конфигураций цилиндрических анаморфотных систем: для систем, состоящих из цилиндрических линз с параллельными образующими и для систем, состоящих из цилиндрических линз с взаимно перпендикулярными образующими. Оба типа анаморфотных цилиндрических систем обладают 16 типами аберраций.

Глава 3 посвящена разработке методики расчета основных характеристик оптического комплекса для цифрового кинематографа.

Формирование изображения в цифровом кинематографе может быть представлено двумя этапами: киносъёмкой и проекцией (рис. 1). На рис. 1: a_1 – дистанция киносъёмки (расстояние от главной плоскости кинообъектива до предмета); a'_1 – расстояние от главной плоскости объектива камеры до изображения; a_2 – расстояние от главной плоскости объектива до матрицы проектора; a'_2 – расстояние от главной плоскости объектива проектора до киноэкрана (длина кинозала); $2y_1$ – линейный размер снимаемого предмета; $2y'_1$ – линейный размер изображения, получаемый на светочувствительной матрице камеры; $2y_2$ – линейный размер предмета, который проецируется матрицей проектора; $2y'_2$ – линейный размер изображения на киноэкране; q – коэффициент электронного преобразования изображения, т. е. отношение высоты и ширины модулирующей матрицы проектора

соответственно к высоте и ширине светочувствительной матрицы камеры. Коэффициент электронного преобразования учитывает возможности трансформирования изображения электронными средствами.

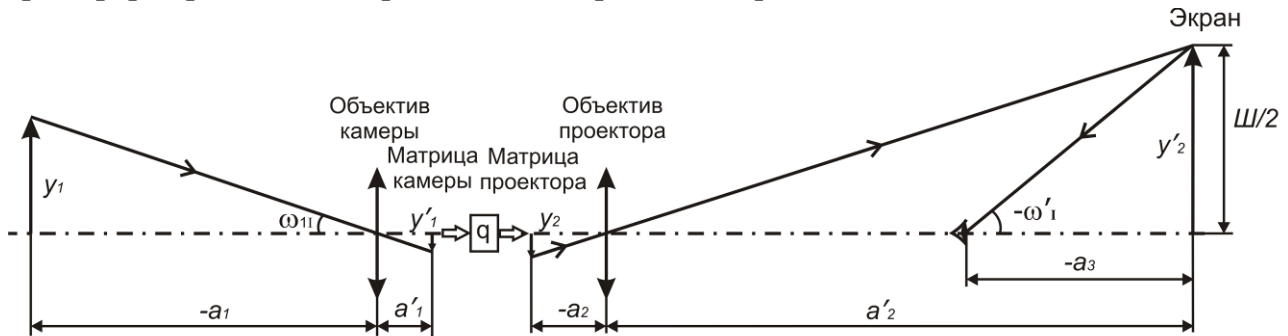


Рис. 1. Этапы формирования изображения в цифровом кинематографе

На первом этапе рассчитываются основные характеристики кинопроекторных объективов при известных основных параметрах кинозала и размеров матриц, используемых в проекторах. Такие параметры зрительных залов, как размер рабочего поля киноэкрана, расстояние от зрителей до экрана рассчитываются при кинотехнологическом проектировании кинозала в соответствии с рекомендациями ОСТ 19-154-2000 и SMPTE EG 18-1994. В кинозале могут демонстрироваться фильмы разных кинематографических форматов. Результаты расчета основных геометрических параметров зрительных залов вместимостью 2050, 850 и 250 зрительских мест приведены в табл. 2 (Д – длина зала; В – высота рабочего поля киноэкрана; ширина рабочего поля при: Ш_ш – широкоэкранный, Ш_к – кашетированной проекциях; a_3 – расстояние от киноэкрана до первого ряда зрительских мест).

Табл. 2. Основные параметры кинозалов

Параметр	Вместимость зала, мест		
	2050	850	250
Д, м	45	36	25
В, м	8,5	7,5	5,3
Ш _ш , м	20,0	18	12,5
Ш _к , м	15,8	13,9	9,8
a_3 , м	17,1	15,1	9,3

Для широкоэкранный проекции с анаморфированным кадром применяют анаморфотные насадки или объективы, которые имеют разное линейное увеличение по горизонтали и вертикали и, как следствие – разные фокусные расстояния. Линейное увеличение такого объектива в горизонтальном β_{lon} и вертикальном сечениях β_{lon} определяются:

$$\beta_{lon} = -\frac{Ш}{b}; \quad \beta_{lon} = -\frac{В}{h}, \quad (2)$$

где b – ширина модулирующей матрицы проектора; h – высота модулирующей матрицы проектора.

Отношение линейных увеличений есть коэффициент анаморфозы:

$$A = \frac{\beta_{lon}}{\beta_{llon}}. \quad (3)$$

Фокусные расстояния проекционного объектива в двух сечениях определяются:

$$f'_{lon} = \frac{f'_{llon} \cdot \beta_{lon} \cdot (1 - \beta_{llon})^2}{\beta_{llon} \cdot (1 - \beta_{lon})^2}; \quad f'_{llon} = \frac{a'_2}{1 - \beta_{lon}}. \quad (4)$$

Допустимый размер одного пикселя модулирующей матрицы y_p определяется из условия неразличимости пиксельной структуры изображения на киноэкране по формулам:

$$y_{pl} = \frac{y'}{\beta_{lon}}; \quad y_{pll} = \frac{y'}{\beta_{llon}}, \quad (5)$$

где $y' = tg(\gamma) \cdot a_3$ – величина видимого глазом изображения на экране; γ – угловой предел разрешения глаза.

На втором этапе рассчитывается киносъёмочный объектив. Так как рассматриваемое глазом изображение было получено в несколько этапов, разделенных в пространстве и времени, для дальнейших расчетов важно условие естественного впечатления ($\Gamma = 1$) и учет электронного преобразования изображения (q).

Фокусные расстояния объективов в двух главных меридианах:

$$f'_{лок} = \frac{a_1 \cdot a_3 \cdot \Gamma}{a_1 \cdot \beta_{lon} \cdot q - a_3 \cdot \Gamma}; \quad f'_{llок} = \frac{a_1 \cdot a_3 \cdot \Gamma}{a_1 \cdot \beta_{llон} \cdot q - a_3 \cdot \Gamma}. \quad (6)$$

Угловые поля объектива в пространстве предмета $2\omega_{II}$ и $2\omega_{III}$ находят из формул:

$$tg(\omega_{II}) = -\frac{III}{2 \cdot \beta_{lk} \cdot \beta_{lon} \cdot a_1}; \quad tg(\omega_{III}) = -\frac{B}{2 \cdot \beta_{llк} \cdot \beta_{llон} \cdot a_1}, \quad (7)$$

где $\beta_{lk} = f'_{лок} / (a_1 + f'_{лок})$ – линейное увеличение в горизонтальном сечении при съемке камерой; $\beta_{llк} = f'_{llок} / (a_1 + f'_{llок})$ – линейное увеличение в вертикальном сечении при съемке камерой.

Диафрагменное число k , которое является основной характеристикой фотографических объективов, можно определить через диаметр диска Эри и длину волны λ :

$$k = \frac{d_э}{2,44 \cdot \lambda}, \quad (8)$$

где $d_э$ – диаметр диска Эри.

Исходя из предельной частоты Найквиста целесообразно, чтобы пятно рассеяния от отдельной точки предмета распределялось как минимум на площадке 2×2 элемента матрицы. Полученные значения диафрагменного числа не учитывают соответствия с энергетическими характеристиками светочувствительной матрицы. Для работы с малыми уровнями освещенности необходимо повышение относительного отверстия.

По методике, изложенной выше, определены основные характеристики проекционных объективов и границы неразличимости пиксельной сетки. Расчеты были проведены для девяти модулирующих матриц, основанных на разных принципах преобразования излучения.

Установлено, что при использовании проекторов с разрешающей способностью 2К и 4К на экране не будет различима пиксельная структура изображения, в виде наложенной на него сетки. Однако, при показе широкоэкранных фильмов проекторы, созданные на основе матриц с разрешением 2К, не могут обеспечить высокого качества изображения, так как на экране зритель будет различать отдельные пиксели модулирующей матрицы. Для демонстрации широкоэкранных фильмов во всех кинозалах нужно использовать проекторы с разрешающей способностью 4К.

В главе 4 рассмотрены оптические базовые схемы анаморфотных оптических систем с цилиндрическими компонентами, образующие которых параллельны. Разработаны методики габаритного расчета при заданном коэффициенте анаморфозы, длине системы и заднем отрезке. Рассчитаны варианты новых киносъёмочных и кинопроекторных анаморфотных объективов с параллельными образующими цилиндрических компонентов.

Анаморфотный объектив может быть образован анаморфотной афокальной насадкой, устанавливаемой перед сферическим объективом (рис. 2). Недостатками этих схем являются большие габаритные размеры цилиндрических компонентов. Достоинством является то, что анаморфотная насадка является самостоятельной системой, но вместе со сферическим объективом, который рассчитывается отдельно – понижает его качество изображения.

На рис. 2, 3 и 4 показаны два меридиональных сечения, разделенные по оси на горизонтальное и вертикальное.

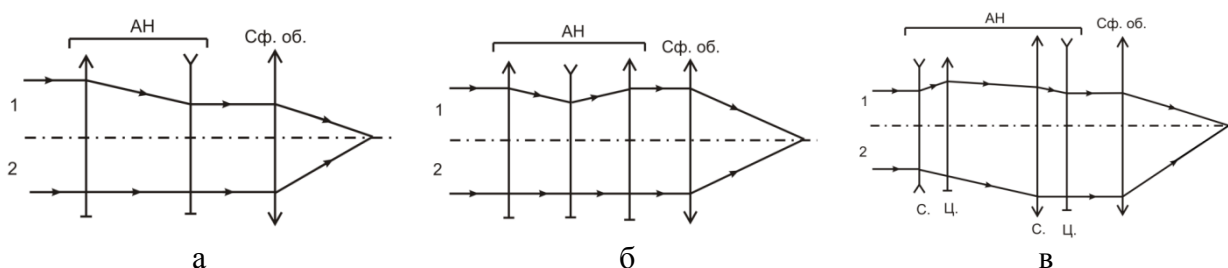


Рис. 2. Принципиальные оптические схемы объектива с анаморфотной насадкой, установленной перед сферическим компонентом

Вторым принципиальным решением являются системы, в которых анаморфотная насадка устанавливается после сферического объектива (рис. 3). Достоинством данного решения являются меньшие габариты цилиндрических компонентов, а недостатком – сложность получения требуемой величины заднего отрезка.

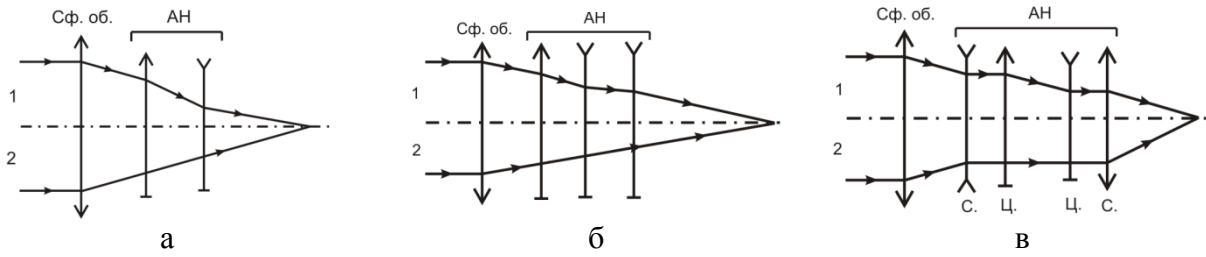


Рис. 3. Принципиальные оптические схемы объектива с анаморфотной насадкой, установленной после сферического компонента

Третьим решением является анаморфотный объектив из цилиндрических линз расположенных вокруг осесимметричного компонента (рис. 4).

Для анаморфотных кинообъективов предметная область имеет прямоугольную форму, вытянутую в горизонтальном направлении. Образующие цилиндрических компонентов могут быть параллельны горизонтальному (рис. 4 а, б) или вертикальному сечению предмета (рис. 4 в, г). Достоинствами таких объективов являются малые габариты и возможность достижения больших значений анаморфозы при высоком качестве изображения.

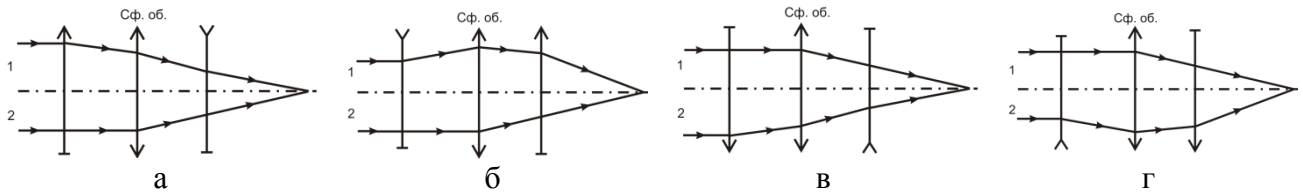


Рис. 4. Принципиальные оптические схемы анаморфотных объективов

Для дальнейших исследований представляют интерес базовые схемы анаморфотных объективов. Они недостаточно изучены, но позволяют существенно расширить диапазон технически реализуемых решений.

В результате исследования и габаритного расчета анаморфотного объектива с параллельными образующими цилиндрических компонентов, используя формулы Б. Н. Бегунова, определено, что длина системы и задний отрезок получаются каждый раз новыми, так как эти параметры не заданы на этапе габаритного расчета. Как следствие, расчет оптической системы определенной длины и заднего отрезка, которые на сегодняшний день определяются техническим заданием на разработку, становится трудоемким процессом из-за подбора задаваемых параметров. Поэтому разработаны новые методики габаритного расчета анаморфотных объективов с параллельными образующими цилиндрических компонентов.

Для расчета первого варианта анаморфотного объектива, (цилиндрические компоненты действуют в горизонтальном сечении) (рис. 5) задаются эквивалентные оптические силы всего объектива в двух сечениях $\Phi_{Iэж}$ и $\Phi_{IIэж} = \Phi_2$, а также задний отрезок объектива a'_3 и длина оптической системы L . Отношение эквивалентных фокусных расстояний есть коэффициент анаморфозы $A = f'_{Iэж} / f'_{IIэж}$.

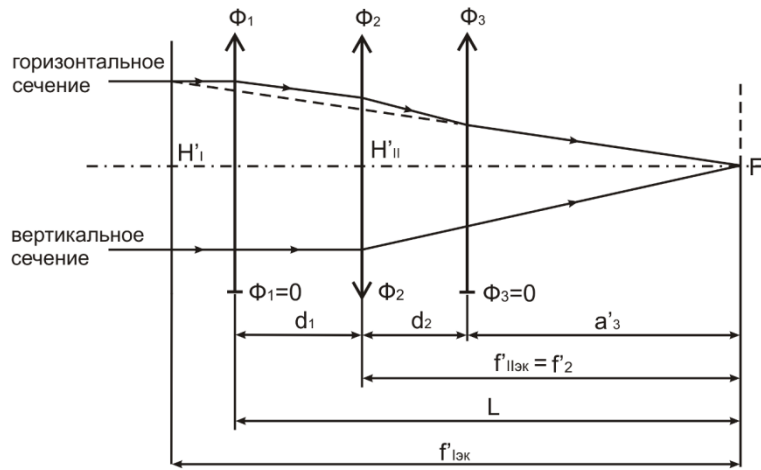


Рис. 5. Оптическая схема анаморфтного объектива из трех тонких компонентов (вариант 1)

Выведены соотношения для определения оптических сил первого и третьего компонентов:

$$\Phi_1 = \frac{a'_3 \Phi_{\text{IIэк}} (\Phi_{\text{IIэк}} - \Phi_{\text{Iэк}})}{a'_3 \Phi_{\text{IIэк}} (L \Phi_{\text{IIэк}} - 2) + 1}, \quad (9)$$

$$\Phi_3 = \frac{\Phi_{\text{Iэк}} - \Phi_{\text{IIэк}}}{a'_3 \Phi_{\text{Iэк}} (L a'_3 \Phi_{\text{IIэк}}^2 - 2 a'_3 \Phi_{\text{IIэк}} + 1)}. \quad (10)$$

Осевые расстояния между компонентами системы определяются:

$$d_2 = \frac{1}{\Phi_2} - a'_3, \quad (11)$$

$$d_1 = L - d_2 - a'_3. \quad (12)$$

Проведено исследование соотношений между габаритными параметрами всей системы. Установлено, что технологически реализуемые варианты объективов могут иметь значения заднего отрезка a'_3 в интервале от нуля до значения фокусного расстояния сферического компонента f'_2 (рис. 6 а). При коэффициенте анаморфозы меньше единицы объектив будет иметь первый отрицательный компонент, второй и третий – положительные (рис. 6 б).

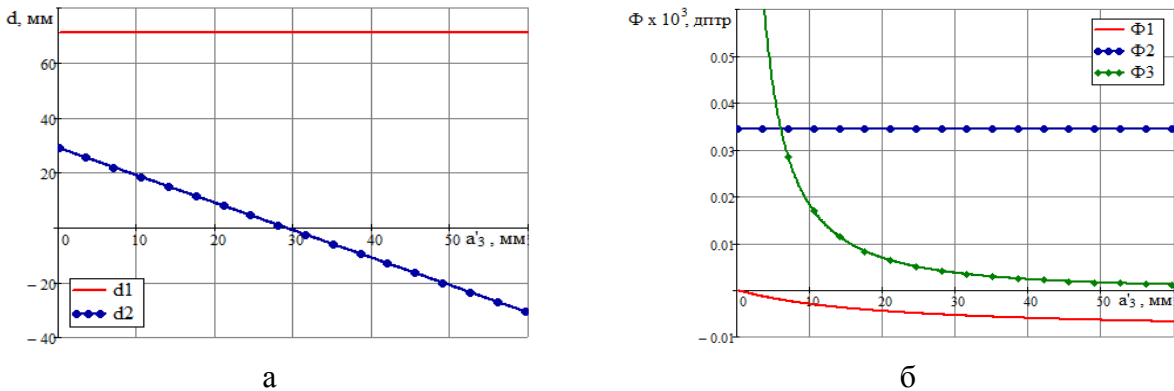


Рис. 6. Графики зависимости от заднего отрезка (a'_3):

а) осевых расстояний (d_1, d_2); б) оптических сил компонентов (Φ_1, Φ_2, Φ_3)

Длина системы не может быть меньше значения заднего фокусного расстояния сферического компонента f'_2 .

При коэффициенте анаморфозы больше единицы в оптической системе первый и второй компоненты будут иметь положительные оптические силы, а третий – отрицательные. Так же исследования габаритных соотношений показали, что по приведенным формулам могут быть рассчитаны анаморфотные объективы с большими значениями коэффициента анаморфозы, например $A = 8$ (рис. 7).

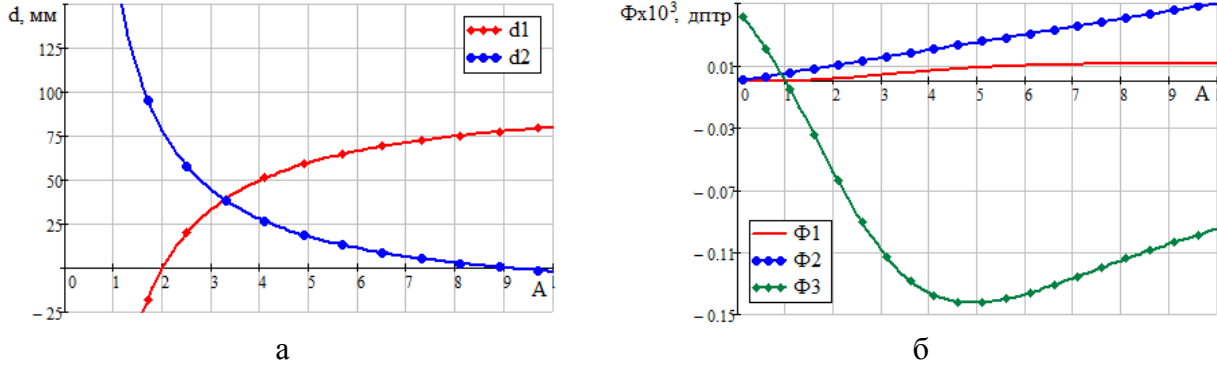


Рис. 7. Графики зависимости от коэффициента анаморфозы (A):
а) осевых расстояний (d_1 , d_2); б) оптических сил компонентов (Φ_1 , Φ_2 , Φ_3)

Для расчета второго варианта анаморфотного объектива (цилиндрические компоненты действуют в вертикальном сечении) (рис. 8) задаются эквивалентные оптические силы всего объектива в двух сечениях $\Phi_{I\text{ЭК}} = \Phi_2$ и $\Phi_{II\text{ЭК}}$, а также задний отрезок a'_3 и длина оптической системы L .

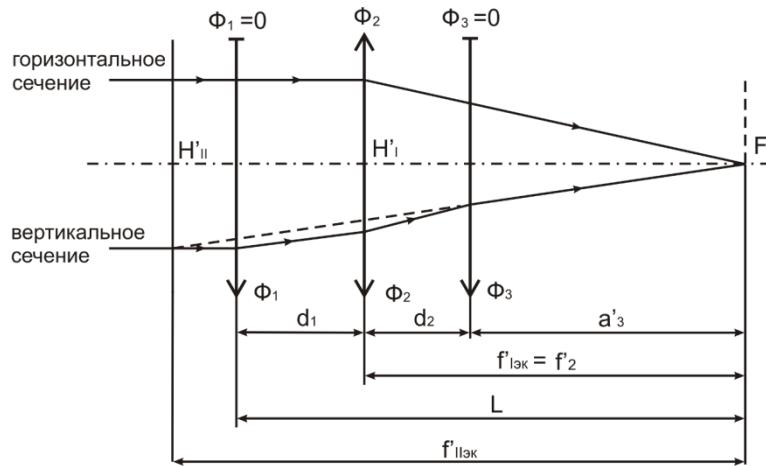


Рис. 8. Оптическая схема анаморфотного объектива из трех тонких компонентов (вариант 2)

Выведены соотношения для определения оптических сил первого и третьего компонентов:

$$\Phi_1 = \frac{a'_3 \Phi_{I\text{ЭК}} (\Phi_{I\text{ЭК}} - \Phi_{II\text{ЭК}})}{a'_3 \Phi_{I\text{ЭК}} (L \Phi_{I\text{ЭК}} - 2) + 1}, \quad (13)$$

$$\Phi_3 = -\frac{\Phi_{I\text{ЭК}} - \Phi_{II\text{ЭК}}}{a'_3 \Phi_{II\text{ЭК}} (L a'_3 \Phi_{I\text{ЭК}}^2 - 2 a'_3 \Phi_{I\text{ЭК}} + 1)}. \quad (14)$$

Осевые расстояния между компонентами определяются по формулам (11) и (12).

Проведено исследование соотношений между габаритными параметрами всей системы для определения области возможных решений. Показано, что

технологически реализуемые варианты систем имеют значения заднего отрезка a'_3 в интервале от нуля до значения фокусного расстояния сферического компонента f'_2 . При коэффициенте анаморфозы меньше единицы объектив будет иметь конструкцию, состоящую из первого и второго положительного компонентов и отрицательного третьего. При коэффициенте анаморфозы больше единицы в оптической системе второй и третий компоненты будут положительными, а первый отрицательным. Так же исследования габаритных соотношений показали, что по представленным формулам могут быть рассчитаны объективы с большими значениями коэффициента анаморфозы (рис. 9).

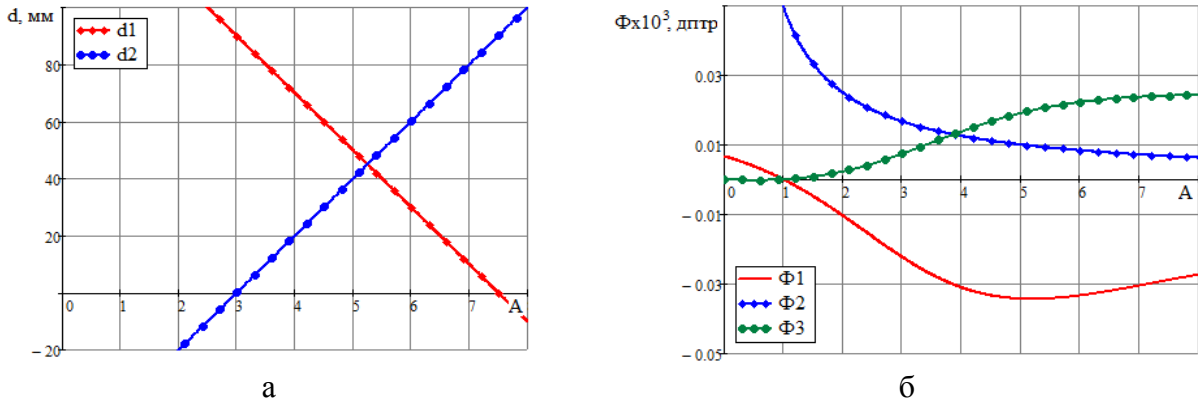


Рис. 9. Графики зависимости от коэффициента анаморфозы (A):
а) осевых расстояний (d_1, d_2); б) оптических сил компонентов (Φ_1, Φ_2, Φ_3)

На основании предложенной методики (вариант 1) разработаны новые малогабаритные киносъёмочные анаморфотные объективы, состоящие из сферических и цилиндрических поверхностей. На рис. 10 представлен вариант рассчитанного анаморфотного объектива. Основные характеристики объектива: $f'_{Iэк} = 21,04$ мм; $f'_{IIэк} = 29,0$ мм; $2\omega_I = 52^\circ$; $2\omega_{II} = 23^\circ$; $D/f' = 1/2,2$. Длина системы составляет 127 мм, а максимальный световой размер первой линзы равен 54 x 32 мм.

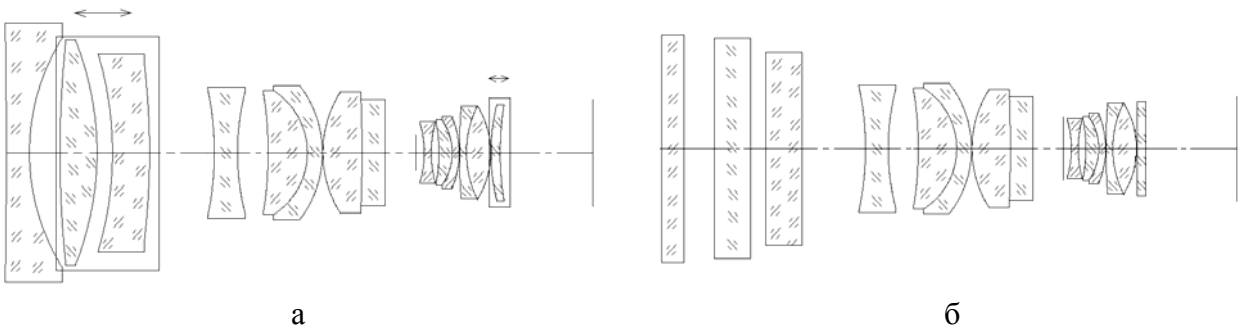


Рис. 10. Оптическая схема анаморфотного объектива в двух взаимно перпендикулярных сечениях:
а) горизонтальное; б) вертикальное

Критерием оценки качества изображения является частотно-контрастная характеристика. Для средней рабочей частоты 50 мм^{-1} контраст должен быть выше 0,4. Рассчитанный объектив удовлетворяет данному требованию, на частоте 50 мм^{-1} контраст для осевой точки поля составляет 0,8 и для всех внеосевых точек поля – выше 0,4 (рис. 11). Дисторсионное искажение рассчитанного объектива составляет -1,11%.

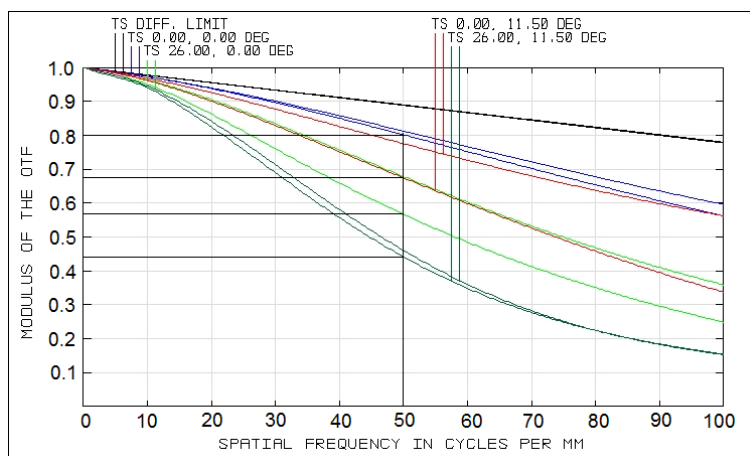


Рис. 11. График частотно-контрастной характеристики

Дополнительно было проведено исследование организации кино съемки с малых дистанций. Высокое качество изображения объектива без перефокусировки сохраняется для объектов находящихся на расстоянии до 10 м. Фокусировку можно организовать перемещением цилиндрических компонентов, выделенных на рис. 10 а. При этом длина системы остается постоянной, что показывает преимущество данного типа оптических систем по сравнению со схемами на основе анаморфотных насадок. Дисторсия при фокусировке объектива уменьшается с $-1,11\%$ до $-1,04\%$. Также при перефокусировке обеспечивается постоянство коэффициента анаморфозы в пределах $0,84\%$ как в центре, так и вне оси для выбранной точки поля. В наилучших образцах анаморфотных насадок при съемке с малых дистанций отклонение величины анаморфозы достигает $\pm 5\%$.

Дополнительное исследование возможности повышения качества изображения с использованием торических поверхностей показало, что возможно уменьшить значения остаточной дисторсии и кривизны изображения. Но существенного улучшения качества от замены цилиндрических поверхностей торическими не выявлено.

Так как расстояние кинопроекции в сравнении с фокусным расстоянием является практической бесконечностью, то целесообразно рассчитывать проекционный объектив, как фотографический в обратном ходе. На сегодняшний день все цифровые проекторы имеют три монохроматические RGB модулирующие матрицы, поляризационные и дихроичные призмы.

На основании предложенной методики разработаны новые малогабаритные проекционные анаморфотные объективы. На рис. 12 представлен вариант анаморфотного объектива рассчитанного в обратном ходе. Основные характеристики объектива: $f'_{I\partial k} = 64,6$ мм; $f'_{II\partial k} = 89$ мм; $2\omega_I = 25^\circ 10'$; $2\omega_{II} = 10^\circ 52'$; $D/f' = 1/3$. Длина системы с призмами составляет 242 мм, а максимальный световой размер первой линзы равен 66 x 44 мм.

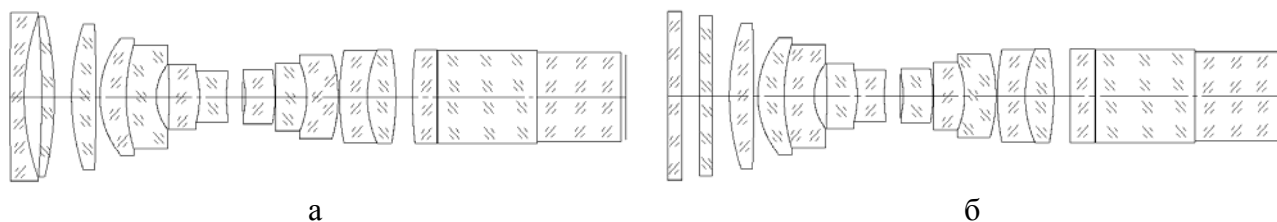


Рис. 12. Оптическая схема анаморфотного объектива в обратном ходе в двух взаимно перпендикулярных сечениях:
а) горизонтальное; б) вертикальное

Критерием оценки качества изображения является частотно-контрастная характеристика. Для средней рабочей частоты 50 мм^{-1} в пространстве модулирующей матрицы контраст должен быть не ниже 0,3. Рассчитанный объектив удовлетворяет данному требованию, на частоте 50 мм^{-1} контраст для осевой точки поля в обратном ходе составляет 0,49 и для всех внеосевых точек поля – выше 0,4 (рис. 13). Дисторсионное искажение рассчитанного объектива составляет -0,26 %.

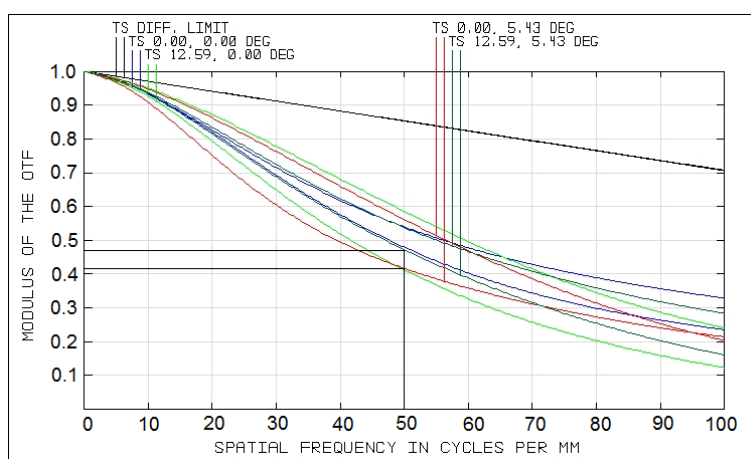


Рис. 13. График частотно-контрастной характеристики

В главе 5 рассмотрены оптические базовые схемы анаморфотных оптических систем с цилиндрическими компонентами, образующие которых взаимно перпендикулярны. Разработаны новые методики габаритного расчета при заданном коэффициенте анаморфозы, длине системы и заднем отрезке. Рассчитаны варианты новых киносъемочных анаморфотных объективов с перпендикулярными образующими цилиндрических компонентов.

Другой подход к композиции базовых схем основан на применении взаимно перпендикулярных цилиндрических компонентов. Здесь возможно три принципиальных решения. Первое – афокальная цилиндрическая насадка устанавливается перед сферическим компонентом (рис. 14).

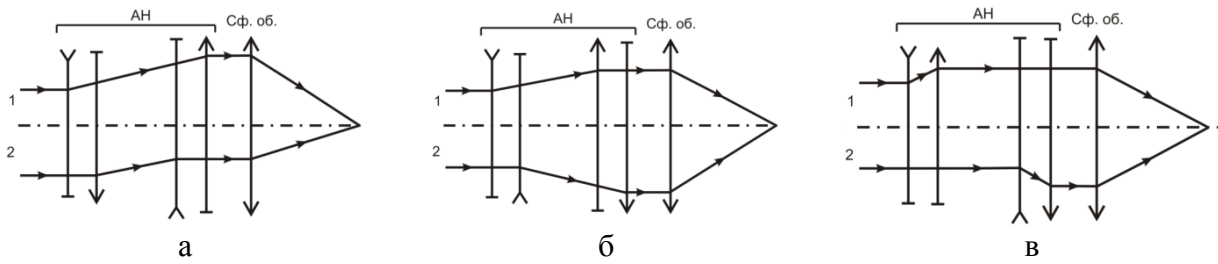


Рис. 14. Принципиальные оптические схемы объективов с аноморфотной насадкой, установленной перед сферическим компонентом

Второе решение – аноморфотная насадка устанавливается после сферического компонента (рис. 15).

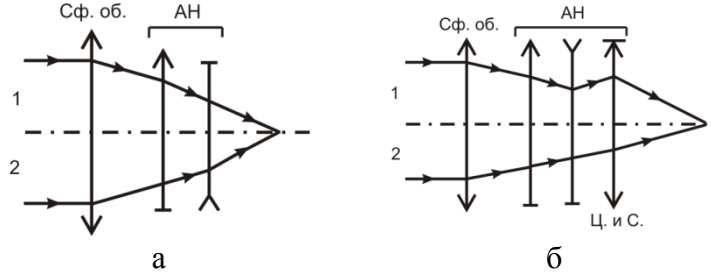


Рис. 15. Принципиальные оптические схемы объективов с аноморфотной насадкой, установленной после сферического компонента

Третьим решением является аноморфотный объектив (рис. 16).

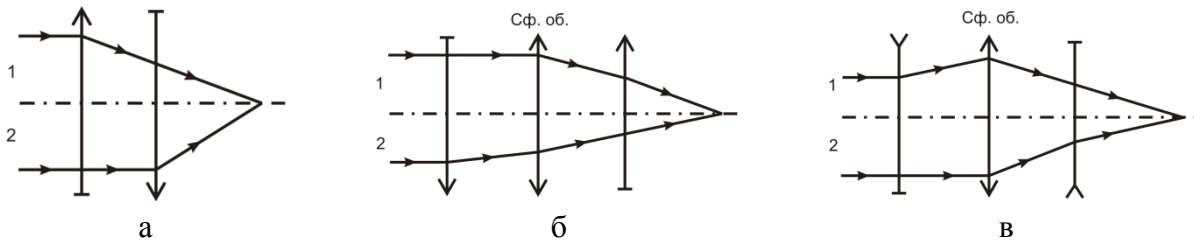


Рис. 16. Принципиальные оптические схемы аноморфотного объектива

В результате исследования и габаритного расчета аноморфотного объектива с перпендикулярными образующими цилиндрических компонентов, используя формулы Б. Н. Бегунова, определено, что расчет малогабаритной оптической системы становится трудоемким процессом из-за необходимого подбора фокусного расстояния f'_2 и заднего отрезка a'_{II} . Поэтому разработаны новые методики габаритного расчета аноморфотных объективов с перпендикулярными образующими цилиндрических компонентов.

Для расчета первого варианта аноморфотного объектива (в горизонтальном сечении действует первый цилиндрический компонент) (рис. 17) задаются эквивалентные оптические силы всего объектива в двух сечениях $\Phi_{Iэк}$ и $\Phi_{IIэк}$, а также расстояние от сферического компонента до плоскости изображения a'_{II} и длина оптической системы L . Отношение эквивалентных фокусных расстояний есть коэффициент аноморфозы $A = f'_{IIэк} / f'_{Iэк}$.

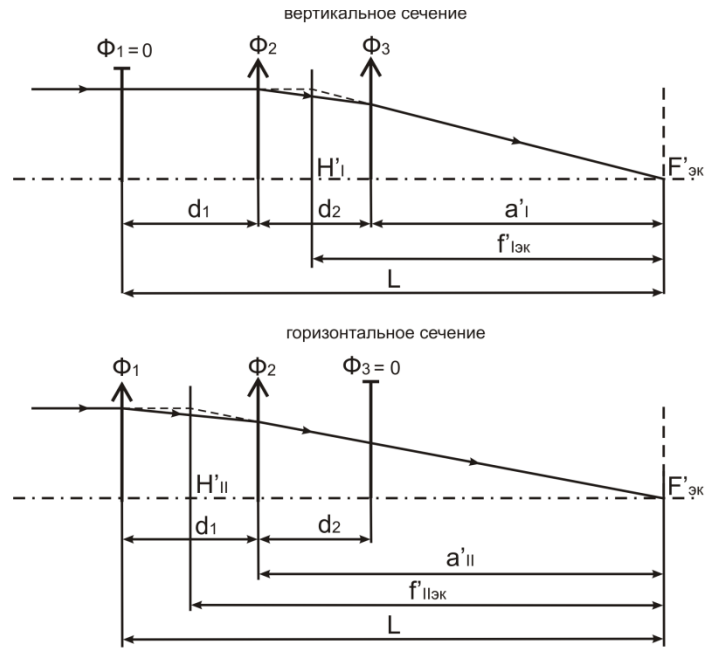


Рис. 17. Оптическая схема анаморфотного объектива из трех тонких компонентов в двух взаимно перпендикулярных сечениях (вариант 1)

Получены соотношения для определения оптических сил компонентов и заднего отрезка в горизонтальном сечении:

$$\Phi_1 = -\frac{a'_{II} \cdot \Phi_{IIэк} - 1}{L - a'_{II}}, \quad (15)$$

$$\Phi_2 = \frac{L \cdot \Phi_{IIэк} - 1}{a'_{II} \cdot \Phi_{IIэк} \cdot (L - a'_{II})}, \quad (16)$$

$$\Phi_3 = -\frac{(\Phi_{Iэк} \Phi_{IIэк} a'_{II} \cdot (a'_{II} - L) + L \Phi_{IIэк} - 1)^2}{a'^2_{II} \Phi_{Iэк} \Phi_{IIэк} \cdot (L - a'_{II}) \cdot (a'_{II} \Phi_{IIэк} - 1)}, \quad (17)$$

$$a'_I = \frac{a'_{II} \cdot (a'_{II} \Phi_{IIэк} - 1)}{\Phi_{Iэк} \Phi_{IIэк} a'_{II} \cdot (a'_{II} - L) + L \Phi_{IIэк} - 1}. \quad (18)$$

Осевые расстояния между компонентами системы определяются:

$$d_1 = L - a'_{II}, \quad (19)$$

$$d_2 = a'_{II} - a'_I. \quad (20)$$

Проведено исследование полученных соотношений. Определено, что технологически реализуемые варианты систем имеют значения a'_{II} в интервале значений эквивалентных фокусных расстояний $f'_{Iэк}$ и $f'_{IIэк}$ (рис. 18 а). При коэффициенте анаморфозы меньше единицы решением является система с двумя отрицательными цилиндрическими компонентами и положительным сферическим (рис. 18 б). При коэффициенте анаморфозы больше единицы решением является оптическая система с тремя положительными компонентами, либо система, где первый и третий компоненты имеют положительные оптические силы, а второй отрицательную.

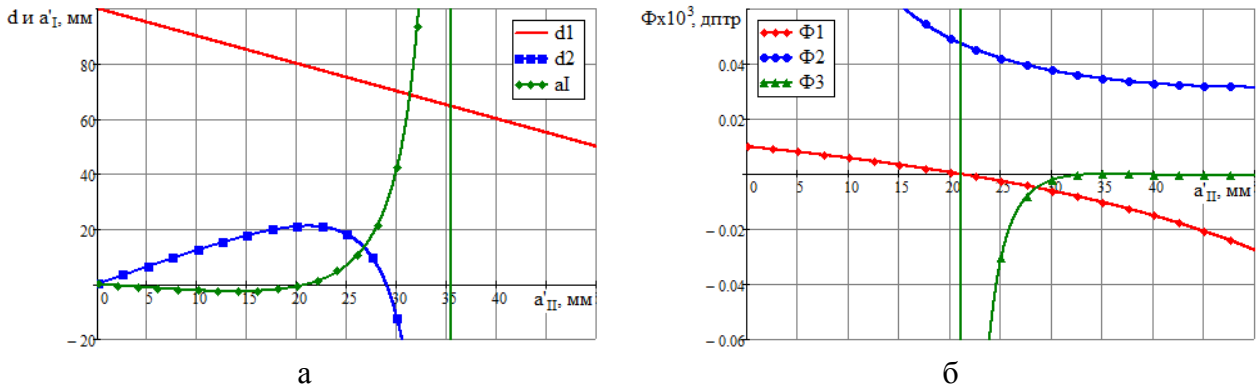


Рис. 18. Графики зависимости от расстояния a'_{II} : а) осевых расстояний (d_1, d_2) и заднего отрезка (a'_I); б) оптических сил компонентов (Φ_1, Φ_2, Φ_3)

Исследования показали, что по приведенным формулам могут быть рассчитаны анаморфотные объективы с большими значениями коэффициента анаморфозы, например, $A = 9$ (рис. 19).

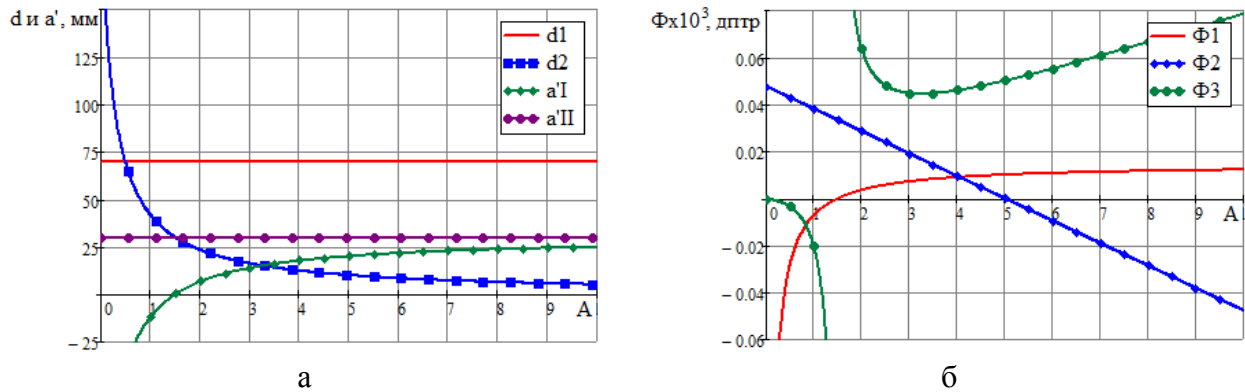


Рис. 19. Графики зависимости от коэффициента анаморфозы (A): а) осевых расстояний (d_1, d_2), заднего отрезка (a'_I) и расстояния a'_{II} ; б) оптических сил компонентов (Φ_1, Φ_2, Φ_3)

На основании предложенной методики разработаны новые малогабаритные киносъемочные анаморфотные объективы, состоящие из сферических и цилиндрических поверхностей. На рис. 20 представлен вариант рассчитанного анаморфотного объектива. Основные характеристики объектива: $f'_{Iэж} = 29$ мм; $f'_{IIэж} = 21,04$ мм; $2\omega_I = 23^\circ$; $2\omega_{II} = 52^\circ$; $D/f' = 1/3$. Длина системы составляет 138 мм, а максимальный световой размер первой линзы равен 87 x 44 мм.

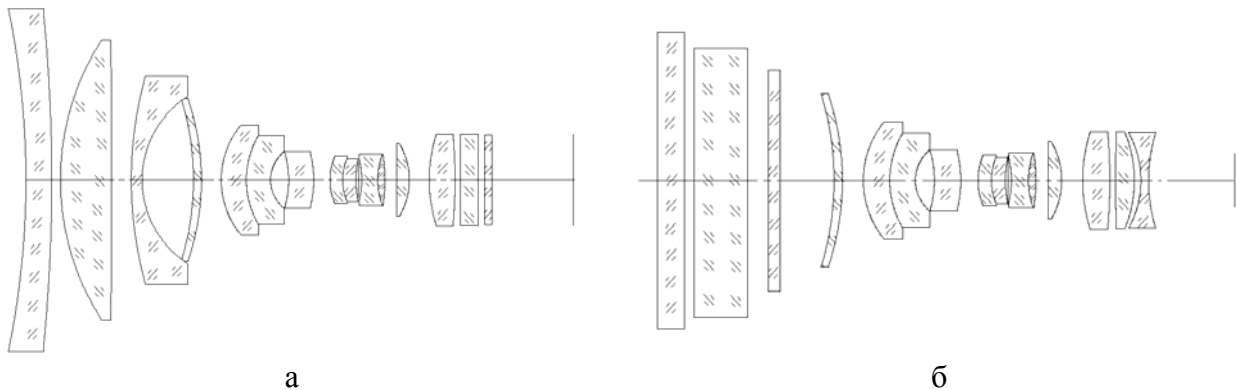


Рис. 20. Оптическая схема анаморфотного объектива в двух взаимно перпендикулярных сечениях:

а) горизонтальное; б) вертикальное

Рассчитанный киносъемочный анаморфотный объектив на частоте 50 мм^{-1} имеет контраст для осевой точки поля 0,66 и для внеосевых точек поля – выше 0,4, за исключением внеосевой точки по диагонали поля (рис. 21). Дисторсионное искажение рассчитанного объектива составляет -1,13 %.

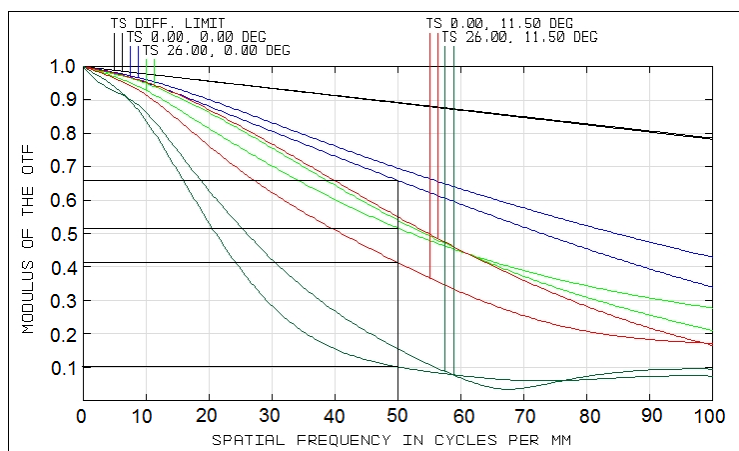


Рис. 21. График частотно-контрастной характеристики

Дополнительное исследование возможности повышения качества изображения с использованием торических поверхностей показало, что при замене цилиндрических поверхностей торическими не происходит существенного улучшения качества.

Для расчета второго варианта анаморфотного объектива (первый цилиндрический компонент действует в вертикальном сечении) (рис. 22) задаются эквивалентные оптические силы всего объектива в двух сечениях $\Phi_{Iэк}$ и $\Phi_{IIэк}$, а также расстояние от сферического компонента до плоскости изображения a'_I и длина оптической системы L .

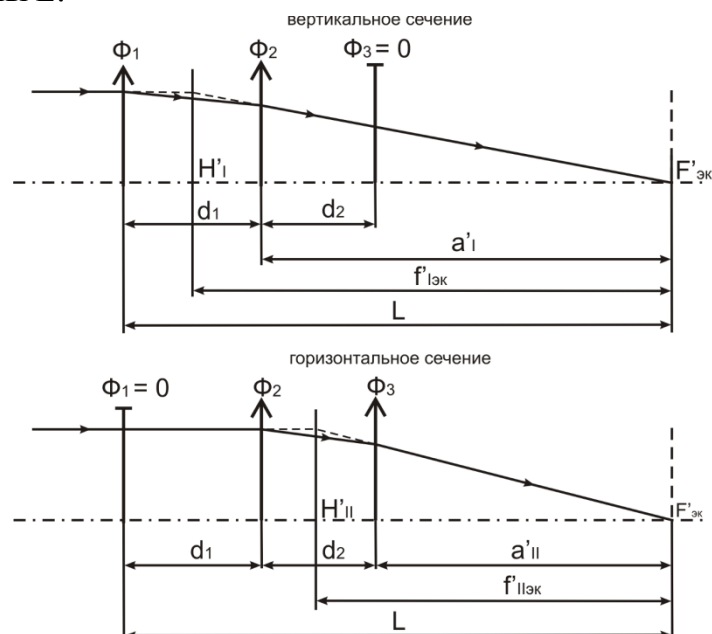


Рис. 22. Оптическая схема анаморфотного объектива из трех тонких компонентов в двух взаимно перпендикулярных сечениях (вариант 2)

Выведены соотношения для определения оптических сил компонентов и заднего отрезка в горизонтальном сечении:

$$\Phi_1 = -\frac{a'_I \cdot \Phi_{I\text{ЭК}} - 1}{L - a'_I}, \quad (21)$$

$$\Phi_2 = \frac{L \cdot \Phi_{I\text{ЭК}} - 1}{a'_I \cdot \Phi_{I\text{ЭК}} \cdot (L - a'_I)}, \quad (22)$$

$$\Phi_3 = -\frac{(\Phi_{I\text{ЭК}} \Phi_{II\text{ЭК}} a'_I \cdot (a'_I - L) + L \Phi_{I\text{ЭК}} - 1)^2}{a'^2_{I\text{ЭК}} \Phi_{I\text{ЭК}} \Phi_{II\text{ЭК}} \cdot (L - a'_I) \cdot (a'_I \Phi_{I\text{ЭК}} - 1)}, \quad (23)$$

$$a'_{II} = \frac{a'_I \cdot (a'_I \Phi_{I\text{ЭК}} - 1)}{\Phi_{I\text{ЭК}} \Phi_{II\text{ЭК}} a'_I \cdot (a'_I - L) + L \Phi_{I\text{ЭК}} - 1}. \quad (24)$$

Затем определяются осевые расстояния между компонентами системы:

$$d_1 = L - a'_I, \quad (25)$$

$$d_2 = a'_I - a'_{II}. \quad (26)$$

Проведено исследование полученных соотношений. Установлено, что технологически реализуемые варианты систем имеют значения a'_I в интервале значений эквивалентных фокусных расстояний $f'_{I\text{ЭК}}$ и $f'_{II\text{ЭК}}$. При коэффициенте анаморфозы меньше единицы решением является система из трех положительных компонентов.

При коэффициенте анаморфозы больше единицы решением является оптическая система, где первый и третий компоненты имеют отрицательные оптические силы, а второй положительную. Исследования показали, что по приведенным формулам могут быть рассчитаны анаморфотные объективы с большими значениями коэффициента анаморфозы, например $A = 7$ (рис. 23).

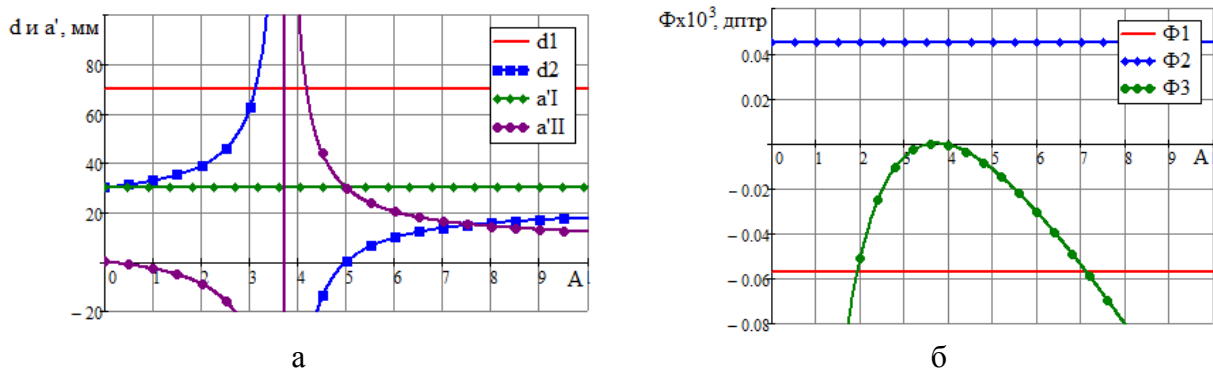


Рис. 23. Графики зависимости от коэффициента анаморфозы (A): а) осевых расстояний (d_1 , d_2), расстояния a'_I и заднего отрезка (a'_{II}); б) оптических сил компонентов (Φ_1 , Φ_2 , Φ_3)

На рис. 24 представлен вариант киносъемочного анаморфотного объектива, рассчитанного по предложенной методике. Основные характеристики объектива: $f'_{I\text{ЭК}} = 29$ мм; $f'_{II\text{ЭК}} = 21,04$ мм; $2\omega_I = 23^\circ$; $2\omega_{II} = 52^\circ$; $D/f' = 1/4,5$. Длина системы составляет 120 мм, а максимальный световой размер первой линзы равен 48 x 28 мм. График ЧКХ представлен на рис. 25. Следует отметить, что при высоком качестве осевой точки, качество внеосевой точки поднять не удастся. Можно сделать вывод,

что данную базовую схему не целесообразно выбирать при расчете анаморфотных объективов.

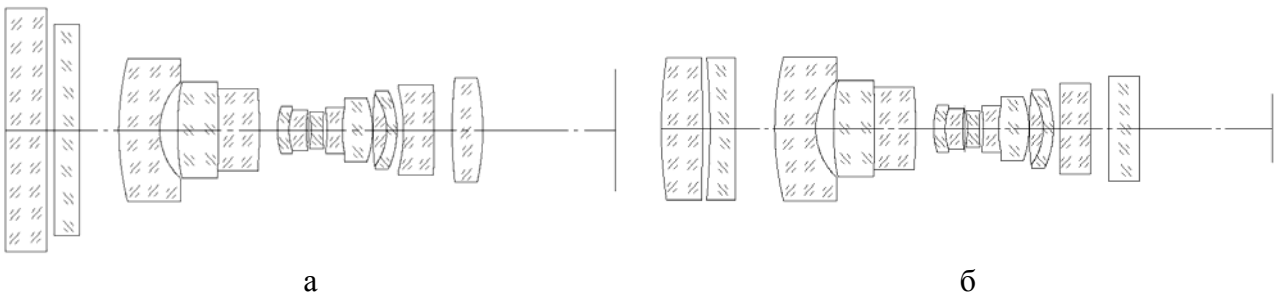


Рис. 24. Оптическая схема анаморфотного объектива в двух взаимно перпендикулярных сечениях:

а) горизонтальное; б) вертикальное

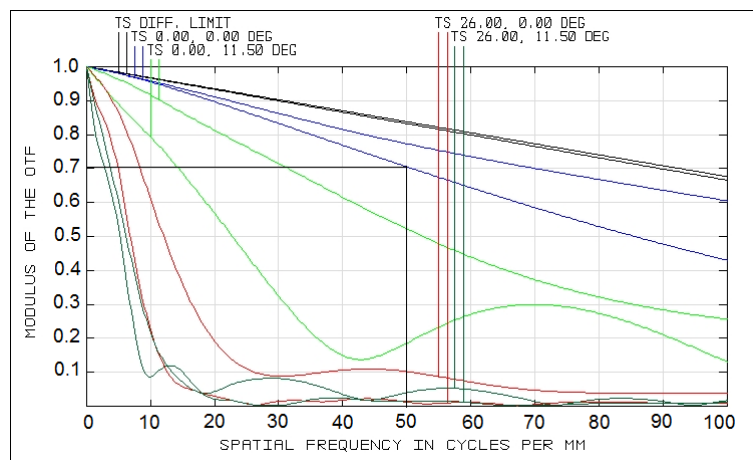


Рис. 25. График частотно-контрастной характеристики

Заключение

1. Выполнен анализ оптических поверхностей, обладающих свойством анаморфирования и оптических базовых схем на их основе.
2. Разработана методика расчета основных характеристик компонентов полного цифрового кинематографического процесса.
3. Разработаны методики габаритного расчета анаморфотных объективов с параллельными образующими цилиндрических компонентов при заданном коэффициенте анаморфозы, длине системы и заднем отрезке.
4. Разработаны методики габаритного расчета анаморфотных объективов с перпендикулярными образующими цилиндрических компонентов при заданном коэффициенте анаморфозы, длине системы и заднем отрезке.
5. На основании разработанных методик рассчитаны новые малогабаритные киносъемочные анаморфотные объективы, состоящие из сферических и цилиндрических поверхностей.
6. На основании разработанных методик рассчитаны новые малогабаритные проекционные анаморфотные объективы, состоящие из сферических и цилиндрических поверхностей.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. *Пруненко Ю.К.* Проектирование анаморфотной системы осветителя // Сборник трудов VII международной конференции «Прикладная оптика – 2006». Т. 3. Компьютерные технологии в оптике СПб, 16-20 октября 2006 / Под ред. М. А. Гана. – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2006. – С. 155–157.
2. *Пруненко Ю. К.* Исследование влияния технологических параметров на качество изображения призмной анаморфотной системы // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Выпуск 38. Исследования в области оптики, приборостроения и управления. Труды молодых ученых. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – С. 58–62.
3. *Пруненко Ю. К., Андреев Л. Н., Бахолдин А. В.* Габаритный расчет анаморфотного сфероцилиндрического объектива // Оптика-2007. Труды V международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика-2007”. СПб, 15–19 октября 2007 / Под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. – С. 281.
4. *Пруненко Ю. К.* Анаморфотный сфероцилиндрический объектив // Сборник тезисов V Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – С. 53.
5. *Пруненко Ю. К.* Телескопические анаморфотные линзы на основе торических поверхностей // Сборник трудов Международной конференции «Прикладная оптика - 2008». Т. 1. Оптическое приборостроение. СПб, 20–24 октября 2008. – СПб.: Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, 2008. – С. 201–204.
6. *Пруненко Ю. К.* Метод расчета анаморфотных сфероцилиндрических объективов // XIII Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов. Аннотации научных работ победителей конкурса грантов Санкт-Петербурга 2008 года для студентов, аспирантов, молодых ученых и молодых кандидатов наук. – СПб.: Фонд «ГАУДЕАМУС», 2008. – С. 131.
7. *Пруненко Ю. К.* Применение анаморфотной оптики в современном оптическом приборостроении // Сборник трудов конференции молодых ученых. Вып. 1 Оптехника и оптическое приборостроение. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 170–178.
8. *Пруненко Ю. К., Андреев Л. Н.* Аберрационные свойства анаморфотных объективов цифровых кинокамер // Оптика-2009. Труды VI международной конференции молодых ученых и специалистов “Оптика-2009”. СПб, 19–23 октября 2009 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – С. 302.
9. *Андреев Л. Н., Бахолдин А. В., Пруненко Ю. К.* Оптика цифрового кинематографа // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – №1. – С. 59–65. **(по перечню ВАК)**