На правах рукописи

МАЛЬКИН АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Разработка методики проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол

05.11.07 – «оптические и оптико–электронные приборы и комплексы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК) на кафедре прикладной оптики.

Научный руководитель: доктор технических наук
Бездидько Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: **Бажанов Юрий Вадимович**
доктор технических наук, профессор, Открытое акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», главный конструктор оптических систем, заместитель начальника отделения 01.

Ширанков Александр Фёдорович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

Ведущая организация: Акционерное общество «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова»

Защита состоится 21 января 2016 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, г.Москва, Гороховский пер. 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии и на сайте http://www.miigaik.ru/nauka/dissertacionyy_sovet/dissertatsii/.

Автореферат разослан «____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Вшивкова
Ольга Владимировна

Актуальность темы. Разработка методики проектирования оптических систем на основе ограниченного перечня марок стёкол является важной задачей, решение которой необходимо не только для уменьшения издержек производства оптических материалов, но и для уменьшения времени, затрачиваемого на проектирование оптических систем различного назначения.

Существующие каталоги оптического стекла содержат широкую номенклатуру марок стекол, многие из которых используются для изготовления только единичных образцов или крайне малых партий деталей, тем не менее, их присутствие в каталогах обязывает предприятие–изготовитель осуществлять технологическую поддержку всей номенклатуры, что влечёт за собой серьёзное увеличение производственных издержек и не всегда позволяет обеспечивать высокое качество отдельных позиций стёкол.

При проектировании оптических систем с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР ОС) без первоначального ограничения количества стекол число возможных комбинаций стёкол слишком велико даже для современной вычислительной техники.

Существенным недостатком отечественной номенклатуры марок бесцветного оптического стекла, представленной в ГОСТ 3514-94, является то, что она плохо адаптирована к требованиям современных САПР ОС. Кроме того, существующие каталоги при автоматизированном проектировании не позволяют учесть целый ряд параметров, необходимых при расчете современных оптических систем, таких например, как зависимость показателя преломления (абсолютного и относительного) от изменения температуры и значения коэффициента теплового линейного расширения стекла (КТЛР).

Учитывая изложенное, можно сказать, что необходимость сокращения номенклатуры оптического бесцветного стекла отечественного производства определяется целым рядом причин, в том числе:

– экономическими (повышение эффективности производства оптических материалов, а также значительное сокращение времени проектирования оптических систем при использовании малых каталогов стёкол);

– экологическими (уменьшение использования экологически вредных материалов, таких как мышьяк, свинец и др.);

– тактико-техническими (обеспечение выполнения специальных технико–эксплуатационных требований (химическая устойчивость, стойкость к влажной атмосфере, термооптические характеристики и т.п.).

Таким образом, разработка методики проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол, а также разработка ограниченного набора марок стёкол, адаптированного под большинство современных САПР ОС, являются **актуальными**.

Цель работы. Целью данной работы является разработка методики проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол.

Задачи исследования:

1. Разработка методики минимизации номенклатуры оптического стекла, представленной в ГОСТ 3514-94, и создание универсального сокращённого каталога бесцветного оптического стекла отечественного производства, достаточного для эффективного использования в программах расчёта оптических систем на всех этапах процесса автоматизированного проектирования.

2. Разработка математической модели дисперсионной зависимости показателя преломления от длины волны излучения (для каждой марки оптического стекла из ГОСТ 3514-94), обеспечивающей повышенную точность определения показателя преломления в рабочем спектральном диапазоне длин волн за счёт избыточных исходных данных.

3. Разработка методики пересчёта изменения показателя преломления в зависимости от изменения температуры, для последующей адаптации в современных САПР ОС.

4. Разработка алгоритма (программы) автоматической замены стёкол на марки из созданного универсального сокращённого каталога бесцветного оптического стекла отечественного производства и проведение исследования по практическому применению разработанных алгоритмов.

Основные идеи диссертационной работы

1. Для проектирования любой оптической системы, базирующейся на бесцветном оптическом стекле, достаточно использовать не более 50% марок стёкол, представленных в ГОСТ 3514-94.

2. В любой оптической системе, спроектированной с использованием бесцветного оптического стекла зарубежных производителей, можно произвести замену марок стёкол на стёкла отечественного производства из ограниченного (оптимизированного) перечня и при этом сохранить её качественные характеристики.

3. Существует алгоритм экстраполяции температурных зависимостей показателей преломления отечественных марок стёкол в спектральном диапазоне от 365 до 2325,4 нм по малому числу замеренных (известных) значений, определённых для видимой области спектра.

Объектом исследования являются оптические системы, предназначенные для работы в спектральном диапазоне пропускания бесцветного оптического стекла, а **предметом исследования** является методика проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол.

Основные научные результаты исследования

1. Разработана методика формирования ограниченного набора марок стёкол отечественного производства, достаточного для решения задач автоматизированного проектирования оптических систем.

2. Предложена качественная математическая модель дисперсионной зависимости показателя преломления от длины волны излучения для отечественных марок стёкол, представленных в ГОСТ 3514–94, совместимая с большинством современных САПР ОС.

3. Разработана методика перевода температурных приращений показателей преломления марок стёкол, представленных в ГОСТ 13659–78, в коэффициенты формулы, определяющей изменение показателя преломления в зависимости от изменения температуры, при проектировании в современных САПР ОС.

4. Найдено алгоритмическое и программное решение автоматической замены применяемых марок стёкол на марки из ограниченного набора при расчёте оптических систем в современных САПР ОС. На основе предложенных алгоритмов разработаны оптические системы для приборов ночного видения и всепогодных телевизионных камер.

Научная новизна работы.

1. Разработанная методика формирования ограниченной номенклатуры марок стёкол, в отличие от существующих, основана на синтезе статистических данных частоты применяемости отечественных марок стёкол и разработанного алгоритма определения эквивалентных марок стёкол по трём основным оптическим параметрам (по показателю преломления для основной длины волны, по коэффициенту дисперсии, по отклонению относительной частной дисперсии от «нормальной линии»).

2. Предложенный метод определения температурных приращений показателей преломления марок стёкол позволяет экстраполировать спектральную область этих приращений от 365 до 1060 нм.

3. В отличие от существующих алгоритмов представленная методика позволяет осуществить оптимальный выбор марок стёкол в разрабатываемых оптических системах по трём дискретным параметрам реальных марок стёкол (по показателю преломления для основной длины волны, по коэффициенту дисперсии, по отклонению относительной частной дисперсии

от «нормальной линии»). Показано, что использование трёх параметров позволяет учесть влияние хроматических аберраций на качественные характеристики анализируемых оптических систем при проведении замены исходной марки стекла на марку из разработанного ограниченного перечня.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии теоретико-методологических основ проектирования оптических систем с использованием минимизированной номенклатуры оптических материалов.

Практическая значимость работы заключается в том, что использование алгоритмов и программных решений автоматической замены применяемых марок стёкол на марки из сформированного в настоящей работе каталога, позволяет сократить время проведения расчётов оптических систем в современных САПР.

Разработанные и представленные в диссертационной работе алгоритмы расчёта оптических систем применяются на АО «Лыткаринский завод оптического стекла» (АО ЛЗОС) при проектировании различных типов оптических систем гражданского и специального назначения (Справка о применении результатов диссертационной работы Малькина Андрея Александровича по теме «Разработка методики проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол» №45-174/1 от 17.06.2014).

Методы диссертационного исследования.

1. Методы формирования оптимального набора оптических материалов при автоматизированном проектировании оптических систем.
2. Методы компьютерного моделирования характеристик оптических материалов.
3. Методы компьютерного моделирования качественных характеристик оптических систем.
4. Методы компьютерной оптимизации конструктивных параметров оптических систем по критерию качества изображения.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Евклидова норма, определяющая область эквивалентных марок стёкол в трёхмерной системе координат оптических параметров стекла (показатель преломления для основной длины волны; коэффициент дисперсии; отклонение относительной частной дисперсии от «нормальной линии»), позволяет проводить расчёт оптических систем с использованием ограниченной номенклатуры марок стёкол.

2. Уравнение Неймана–Кеттлера позволяет с высокой точностью определять дисперсионную зависимость показателя преломления от длины волны излучения для отечественных марок стёкол, представленных в ГОСТ 3514–94.

3. Полиноминальное уравнение приращения показателя преломления стекла от изменения температуры позволяет экстраполировать температурные изменения показателей преломления стёкол в спектральном диапазоне длин волн от 365 до 1060 нм с высокой точностью по минимальному числу исходных данных, определённых в видимой области спектрального диапазона длин волн.

Достоверность научных и практических результатов подтверждается результатами компьютерного моделирования и практического применения алгоритма расчёта оптических систем с использованием разработанного ограниченного набора марок стёкол отечественного производства при проектировании оптических систем.

Кроме этого, разработанные в процессе выполнения диссертационной работы оптические системы были изготовлены на АО ЛЗОС и подтвердили свои тактико–технические характеристики. Две из представленных в диссертационной работе оптических систем, спроектированных с применением разработанного алгоритма расчёта оптических систем, защищены патентами РФ на изобретение №2545465 и №2560748.

Личный вклад автора.

Все выносимые на защиту научные положения, результаты и выводы получены лично соискателем.

Апробация работы.

Наиболее значимые результаты, приведенные в диссертации, были представлены автором на следующих научных конференциях:

1. Научно–практическая конференция «Актуальные проблемы приборостроения, информатики и социально–экономических наук». – МГУПИ. (2013 г.)
2. VIII Международной конференции молодых учёных и специалистов «Оптика – 2013». – НИУ ИТМО. (2013 г.)
3. Международная научно–техническая конференция «Геодезия, картография, кадастр – современность и перспективы», посвящённая 235–летию основания МИИГАиК. – МИИГАиК. (2014г.)
4. «23–я Международная научно–техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения». – ОАО «НПО «Орион». (2014г.)
5. Научно–практическая конференция «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования». – ОАО ЛЗОС. (2014г.)
6. VIII Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики-2014» – НИУ ИТМО. (2014г.)
7. XI Международная конференция «Прикладная оптика–2014» – «ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова». (2014г.)
8. III Конференция молодых ученых и специалистов «Будущее оптики–2015» – «ОАО «ГОИ им. С.И. Вавилова». (2015г.)

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 10 работ, включая 1 публикацию рецензируемого издания, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ, и 2 патента на изобретение.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Общий объем работы – 173 страницы машинописного текста, включая 45 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 66 наименований и четыре приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение диссертационной работы посвящено обоснованию актуальности выбранной темы. Во введении сформулированы цели и задачи выполненного исследования, приведены положения, раскрывающие его научную новизну и практическую ценность, изложены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведён анализ существующих алгоритмов использования ограниченных наборов стёкол при проектировании оптических систем, рассмотрены различные методы формирования ограниченного перечня оптических материалов.

Показано, что методика профессора Г.Г. Слюсарева и С.В. Трубко комплектования марок стёкол в двухлинзовых склеенных объективах по принципу «крон впереди» или «флинт впереди» по трём основным параметрам C, P и W имеет ряд недостатков:

– методика предназначена для работы только в параксиальной области;

– возможна работа только с центрированными оптическими системами;

– возможна работа только в видимой области спектрального диапазона длин волн;

– нелинейность в поиске оптимальных марок стёкол при расчёте оптических систем;

– методика не интегрирована в современные САПР ОС.

При расчёте сложных оптических систем, например светосильных объективов с большим углом поля зрения, методика расчёта систем, состоящих из бесконечно тонких компонентов, основанная на теории аберраций 3-го порядка, становится малодейственной и может служить только для определения направлений дальнейших исследований.

Практика показывает, что при автоматизированном проектировании оптических систем использование «простых моделей» стёкол, определяемых тремя параметрами: показателем преломления (n_d), коэффициентом дисперсии (υ_d) и отклонением от «нормальной линии» $\Delta P_{g,F}$ позволят уйти от нелинейности в поиске оптимальных марок стёкол.

Оценивают близость «простой модели» стекла к её реальному аналогу при помощи евклидовой нормы:

$$d = \left\| \chi_{реал.} - \chi_{теор.} \right\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} \left[k_i \left(\chi_{i\,реал.} - \chi_{i\,теор.} \right) \right]^2}, \qquad (1)$$

где $\chi_{теор.}$ – параметр «модели» стекла; $\chi_{реал.}$ – параметр реального (измеренного) стекла; k_i – масштабный коэффициент.

Дополнительным требованием к области ограничений в пространстве параметров являются ограничения по значениям каждого из указанных параметров χ_i.

Наиболее качественной аппроксимацией «простых моделей» стёкол обладает дисперсионная формула Конради:

$$n = n_0 + \frac{A}{\lambda} + \frac{B}{\lambda^{3,5}}, \qquad (2)$$

где n_0, A, B – дисперсионные коэффициенты, λ - расчётная длина волны в мкм.

Выражение (2) достаточно качественно аппроксимирует дисперсионную зависимость большинства марок бесцветного оптического стекла в области спектра от 404,66 до 706,52 нм.

Формировать «простую модель» стекла можно по трём параметрам: по показателю преломления для основной длины волны (например, n_d),

коэффициенту дисперсии (например, υ_d) и отклонению от «нормальной линии» ($\Delta P_{g,F}$) по системе уравнений:

$$\begin{cases} n_g - n_F = \dfrac{A\cdot(\lambda_F-\lambda_g)}{\lambda_g\cdot\lambda_F} + \dfrac{B\cdot(\lambda_F^{3,5}-\lambda_g^{3,5})}{\lambda_g^{3,5}\cdot\lambda_F^{3,5}}; \\ \dfrac{n_d-1}{\nu_d} = \dfrac{A\cdot(\lambda_C-\lambda_F)}{\lambda_F\cdot\lambda_C} + \dfrac{B\cdot(\lambda_C^{3,5}-\lambda_F^{3,5})}{\lambda_F^{3,5}\cdot\lambda_C^{3,5}}; \\ n_d = n_0 + \dfrac{A}{\lambda_d} + \dfrac{B}{\lambda_d^{3,5}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $n_g - n_F$, определяется из выражения:

$$\Delta P_{g,F} = \frac{n_g - n_F}{n_F - n_C} - (0{,}64771 - 0{,}0017611\cdot\nu_d). \quad (4)$$

Исследования показали, что отклонение показателя преломления «простой модели» стекла вызывает смещение кривой хода дисперсии вдоль оси n_λ. В свою очередь, отклонение коэффициента дисперсии приводит к повороту дисперсионной кривой относительно точки с координатами (n_d; 587,56). Изменение отклонения относительной частной дисперсии от «нормальной линии» в «простой модели» стекла приводит к изменению «кривизны» графика дисперсионной функции, при этом эти графики имеют общую точку (точку касания) с координатами (n_d; 587,56).

Таким образом, параметры n_d, υ_d и $\Delta P_{g,F}$ позволяют достаточно точно описать характер хода дисперсионной кривой стекла в видимой части спектрального диапазона длин волн.

К сожалению, использование «простых моделей» стёкол имеет существенные недостатки при проектировании оптических систем:

– использование «простой модели» стекла оправдывает себя только при разработке оптических систем, работающих в области спектра от 404,66 до 706,52 нм;

– оптические характеристики «простой модели» стекла, полученной в процессе расчёта оптических систем, как правило, не совпадают с характеристиками реальных марок стёкол.

Ещё одним подходом к решению задачи оптимального выбора стёкол при расчёте оптических систем является последовательный перебор различных марок стёкол и переоптимизация исследуемой оптической схемы (с каждым новым стеклом) с целью подбора наиболее подходящего оптического материала. Как правило, для решения этой задачи в большинстве современных САПР ОС используются сложные алгоритмы поиска оптимальных решений. Такой поиск может занимать от нескольких часов до нескольких месяцев (в зависимости от количества марок стёкол в исследуемом «машинном» каталоге), что является существенным недостатком.

Другой подход – это метод минимизации номенклатуры оптических материалов основанный на определении, так называемой, «эффективной области стекла», основанный на выражении (1).

Известно, что вторичный спектр (хроматическая аберрация положения) двухлинзового объектива, ахроматизированного для F и λ выражается формулой:

$$\Delta s'_{\lambda,F} = \frac{P'_{\lambda,F} - P''_{\lambda,F}}{\nu'_d - \nu''_d} \cdot f, \tag{5}$$

где $P'_{\lambda,F}$ и ν'_d – относительная частная дисперсия и коэффициент дисперсии стекла первой линзы; $P''_{\lambda,F}$ и ν''_d – относительная частная дисперсия и коэффициент дисперсии стекла второй линзы; f – фокусное расстояние объектива.

Апохроматизация (исправление вторичного спектра) для луча с длиной волны λ наступит при условии $\Delta s'_{\lambda,F} = 0$.

Отклонение коэффициентов дисперсии от «нормальной линии» определяется выражением:

$$\Delta \nu_{d\,\lambda,F} = \nu_d + \frac{P_{\lambda,F} - a_{\lambda,F}}{b_{\lambda,F}}, \tag{6}$$

Отклонение от «нормальной линии» определяется зависимостью:

$$\Delta P_{x,y} = P_{x,y} - (a_{xy} + b_{xy} \cdot \nu_d), \tag{7}$$

где $P_{x,y}$ – относительная частная дисперсия, определяемая по формуле:

$$P_{x,y} = \frac{n_x - n_y}{n_F - n_C}, \tag{8}$$

где n_x и n_y – показатели преломления для границ спектральной области длин волн; a_{xy}, b_{xy} – коэффициенты, определяющие наклон «нормальной линии» в системе координат (ν_d; $\Delta P_{x,y}$).

Используя (5) – (8), можно получить следующее эквивалентное выражение:

$$\begin{cases} \Delta s'_{\lambda,F'} = \dfrac{P'_{\lambda,F} - P''_{\lambda,F}}{\nu'_d - \nu''_d} \cdot f; \\ \Delta s'_{\lambda,F'} = \left(b_{\lambda,F} - \dfrac{\Delta P'_{\lambda,F} - \Delta P''_{\lambda,F}}{\nu'_d - \nu''_d} \right) \cdot f; \\ \Delta s'_{\lambda,F'} = b_{\lambda,F} \cdot \left(1 - \dfrac{\Delta \nu'_d - \Delta \nu''_d}{\nu'_d - \nu''_d} \right) \cdot f. \end{cases} \tag{9}$$

В таком случае, для поиска оптимальной области определения «близких» марок стёкол необходимо представить неравенство (7) (с учётом анализа «простых моделей» стёкол) в общем виде:

$$R_{\max} \geq \sqrt{(k_1 \cdot \Delta \nu_d)^2 + (k_2 \cdot \Delta n_d)^2 + \left[k_3 \cdot \left(\Delta P'_{\lambda,F} - \Delta P''_{\lambda,F}\right)\right]^2}, \tag{10}$$

где $\Delta \upsilon_d$ – разница между коэффициентом дисперсии стекол из исследуемого каталога; Δn_d – разница между показателями преломления стекол из исследуемого каталога. ($\Delta P'_{\lambda,F}$–$\Delta P''_{\lambda,F}$) – разница между отклонениями относительных частных дисперсий от «нормальной линии» двух марок стёкол из рассматриваемого каталога: k_1, k_2, k_3, – весовые коэффициенты.

Известно, что для оптического стекла из ГОСТ 3514-94 значения показателей преломления (n_d) колеблются от 1,44 до 2,17; значения коэффициентов дисперсии (ν_d) от 16,6 до 91,5; значения отклонений относительных частных дисперсий от «нормальной линии» ($\Delta P_{g,F}$) от минус

0,01 до плюс 0,0496. Для того, чтобы влияние параметров Δn_d, $\Delta \upsilon_d$, $(\Delta P'_{\lambda,F}-\Delta P''_{\lambda,F})$ отечественных марок стёкол находилось на одном уровне были приняты следующие значения масштабных коэффициентов k_1=0,01, k_2=1, k_3=10.

В таком случае выражение (10) принимает вид:

$$R_{\max} \geq \sqrt{(0{,}01 \cdot \Delta \nu_d)^2 + (\Delta n_d)^2 + \left[10 \cdot \left(\Delta P'_{\lambda,F} - \Delta P''_{\lambda,F}\right)\right]^2}\,, \qquad (11)$$

На основе исследований, проведённых в первой главе, разработана программа на макроязыке ZEMAX, необходимая для группировки стёкол по выражению. (11).

Во второй главе представлен математический аппарат аппроксимации дисперсионной зависимости показателя преломления от длины волны $n(\lambda)$ реальных марок стёкол и проанализирована возможность создания «машинного» каталога отечественных марок бесцветного оптического стекла. Среди основных научных результатов, полученных в настоящей главе, можно выделить следующие:

1. Применение наборов значений показателей преломления, аппроксимированных в «широкой» области спектрального диапазона (от 365 до 2325,4нм) по дисперсионным формулам Аббе или Шотта, Зельмейера, Герцбергера приводит к неизбежным ошибкам в расчётах оптических систем в современных САПР ОС.

Математическая модель определения дисперсионной зависимости $n(\lambda)$ по наглядным параметрам В.Г. Резника качественна, но, к сожалению, не адаптирована для работы с современными САПР ОС и достаточно громоздка (имеет больше десяти полиноминальных коэффициентов, определяющих каждую конкретную марку стекла).

2. На основе анализа всей номенклатуры оптического стекла из ГОСТ 3514-94 (за исключением радиационно–стойких стёкол) с целью определения качества аппроксимации дисперсионной зависимости $n(\lambda)$ по методикам

применяемым в современных САПР ОС; выявлено, что дисперсионная формула Неймана–Кеттлера (Extended 2):

$$n^2 = a_0 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda^{-2} + a_3\lambda^{-4} + a_4\lambda^{-6} + a_5\lambda^{-8} + a_6\lambda^4 + a_7\lambda^6, \quad (12)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7 – дисперсионные коэффициенты,

даёт наиболее качественную аппроксимацию зависимости $n(\lambda)$ в спектральном диапазоне длин волн от 365 до 2325,4 нм.

В третьей главе представлен результат анализа оптических схем отечественного производства с целью замены марок стёкол на «соседние» без заметного ухудшения качества изображения. Расчёт проводился в программе ZEMAX с помощью специально написанной подпрограммы (макроса) и «машинного» каталога марок стёкол на базе формулы (12).

Проведённые исследования показали, что увеличение расстояния R_{max} между отдельными позициями стёкол приводит к необходимости использования более сложного алгоритма оптимизации оптических систем (рисунок 1).

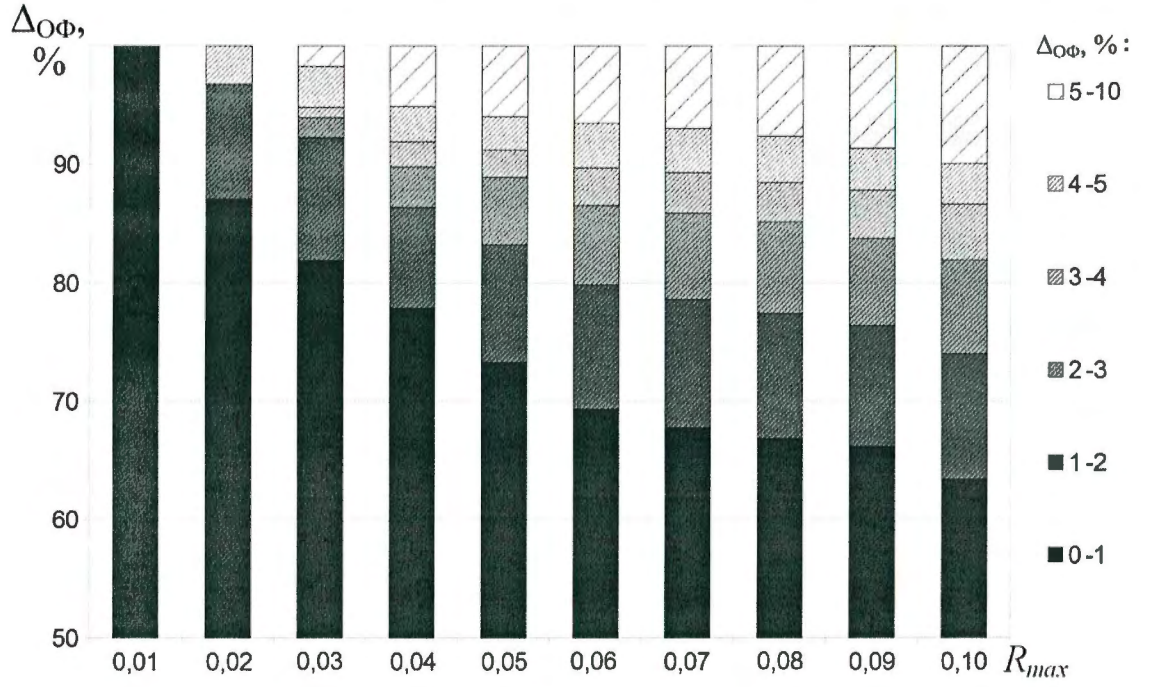

Рисунок 1 – Диаграмма распределения отклонения оценочной функции ($\Delta_{ОФ}$) от величины R_{max}

Среди основных научных результатов, полученных в настоящей главе, можно выделить следующие:

1 Определена оптимальная величина R_{max} (R_{max}=0,04), при которой отечественная номенклатура стёкол сокращается до пятидесяти трёх марок, при этом вероятность нахождения «хороших» оптических схем снижается не более чем на 5% (рисунок 1).

2. Увеличение значения R_{max} более 0,04 приводит к сокращению номенклатуры и приводит к повышению себестоимости отдельных позиций стёкол и всего каталога в целом, поскольку в ограниченном каталоге начинают преобладать нетехнологичные марки стёкол. Кроме этого, увеличение значения R_{max} приводит к более сложному алгоритму подбора марок стёкол в существующих и вновь разрабатываемых оптических системах.

Таким образом, неравенство (11), определяющее «эффективную область» стекла, примет вид:

$$0{,}04 \geq \sqrt{(0{,}01 \cdot \Delta\nu_d)^2 + (\Delta n_d)^2 + \left[10 \cdot (\Delta P'_{\lambda,F} - \Delta P''_{\lambda,F})\right]^2}\,, \qquad (13)$$

3. Разработан рекомендованный перечень марок стёкол отечественного производства, включающий пятьдесят три марки бесцветного оптического стекла.

В главе 4 представлены результаты работы по формированию ограниченной номенклатуры марок стёкол на основании выражений (12) и (13), достаточной для проведения расчётов оптических систем в полном объёме (в том числе для проведения термооптических расчётов).

Для отечественно номенклатуры марок стёкол определены и включены в разработанный «машинный» каталог коэффициенты, необходимые для определения изменения абсолютной величины показателя преломления для заданной температуры по формуле:

$$\frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT} = \frac{n^2(\lambda,T_0)-1}{2 \cdot n(\lambda,T_0)} \cdot \left(D_0 + 2 \cdot D_1 \cdot \Delta T + 3 \cdot D_2 \cdot \Delta T^2 + \frac{E_0 + 2 \cdot E_1 \cdot \Delta T}{\lambda^2 - \lambda_{TK}^2} \right). \qquad (14)$$

где: $n(\lambda,T_0)$ – относительный показатель преломления для стандартной температуры стекла; T_0 – стандартная температура стекла (20°C); ΔT – отклонение температуры от стандартного значения (°C); λ– расчётная длина волны (мкм); D_0, D_1, D_2, E_0, E_1, λ_{TK} – полиноминальные коэффициенты.

Для ограниченного числа исходных данных $\beta_{abs}(\lambda,T)$ автором данной диссертационной работы была разработана упрощённая форма записи выражения (14), которая позволяет избежать «мнимых» решений:

$$\frac{dn_{abs}(\lambda,T)}{dT}=\frac{n^2(\lambda,T_0)-1}{2\cdot n(\lambda,T_0)}\cdot\left(A_0+2\cdot A_1\cdot\Delta T+\frac{B_0+2\cdot B_1\cdot\Delta T}{\lambda^2}\right), \qquad (15)$$

Значения коэффициентов A_0, A_1, B_0, B_1 можно определить, используя линейный метод наименьших квадратов (МНК).

Разработанная методика расчёта отклонения показателя преломления в зависимости от температуры окружающей среды может применяться во всех САПР ОС. Кроме этого, представленная модель (15) позволяет достаточно точно определить величину отклонения абсолютного показателя преломления (в зависимости от температуры) в ближней УФ и ближней ИК областях спектрального диапазона.

В пятой главе представлены результаты практического применения методики проектирования оптических систем с использованием разработанного ограниченного перечня марок стёкол отечественного производства.

Среди основных результатов, полученных в настоящей главе, можно выделить следующие:

1. Разработана программа по автоматической замене стёкол в оптических системах на марки из ограниченного перечня (ПАЗС), блок-схема которой представлена на рисунке 3

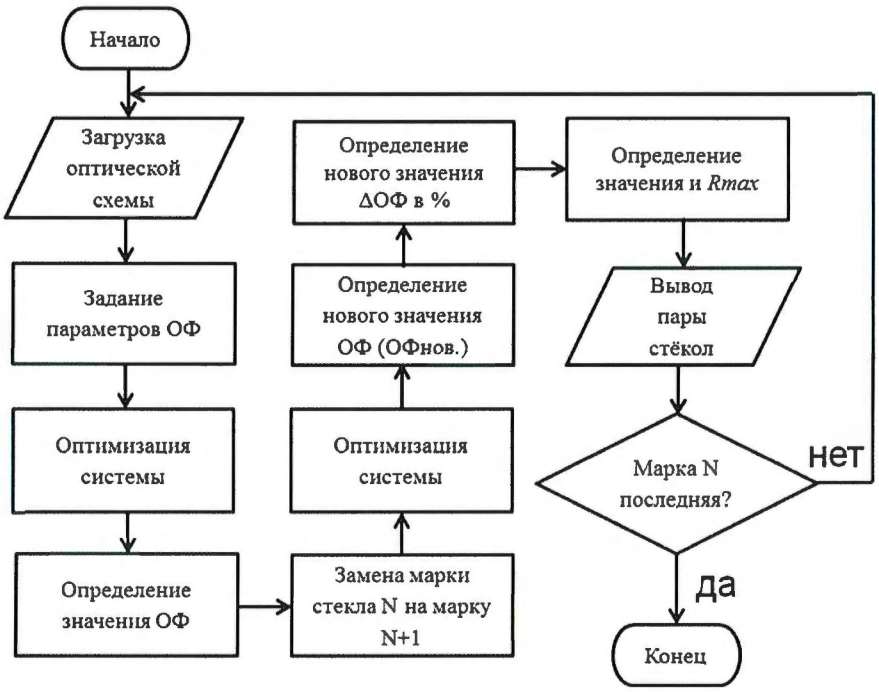

Рисунок 3 – Блок–схема программы по автоматической замене стёкол в оптических системах (ПАЗС)

2. Приведены примеры расчёта оптических систем, базирующихся на зарубежной номенклатуре оптических материалов, подтверждающие высокую эффективность представленной в настоящей диссертационной работе методики расчёта оптических систем.

Кроме этого, в главе 5 представлены некоторые результаты практического применения ПАЗС при расчёте и последующем изготовлении оптических систем на АО ЛЗОС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель – разработана методика проектирования оптических систем с использованием ограниченного набора марок стёкол.

Итоги выполненного исследования:

1. На основании анализа существующих методик расчёта оптических систем с использованием ограниченной номенклатуры марок стёкол

разработана методика минимизации номенклатуры оптического стекла, указанного в ГОСТ 3514–94.

2. Для эффективной работы с разработанным ограниченным перечнем бесцветного оптического стекла отечественного производства автором проведены исследования различных способов формирования дисперсионных моделей отечественных марок стёкол. В результате этих исследований определена математическая модель, достаточно точно описывающая зависимость показателя преломления стекла от длины волны оптического излучения. Предложенная модель универсальна для всех современных САПР ОС.

3. С целью детального анализа качества работы разработанной методики проектирования оптических систем, а также повышения конкурентоспособности отечественной номенклатуры бесцветного оптического стекла за счёт введения дополнительных параметров разработана методика расчёта зависимости показателя преломления отечественных марок стёкол от изменения температуры окружающей среды по шести коэффициентам в спектральном диапазоне длин волн от 365 до 1060 нм.

4. На основании анализа существующих алгоритмов расчёта оптических систем и проведённых исследований разработана оригинальная методика проектирования оптических систем с применением ограниченной номенклатуры марок стёкол.

Проведённые исследования позволили сформировать минимизированный «машинный» каталог оптического бесцветного стекла для современных САПР ОС, включающий в себя дисперсионные коэффициенты формулы Неймана-Кеттлера, термооптические постоянные и КТЛР.

На основе проведённых исследований разработана гамма светосильных объективов для приборов ночного видения и телевизионных камер, которые

впоследствии были изготовлены на АО ЛЗОС и подтвердили свои тактико–технические характеристики.

Представленные в диссертационной работе исследования по минимизации номенклатуры марок бесцветного оптического стекла, а также разработанная методика проектирования оптических систем с применением автоматической замены стёкол в оптических системах (ПАЗС) позволяют повысить эффективность расчёта оптических систем в современных САПР ОС.

Выводы по диссертационной работе:

1. Исследования, проведённые в рамках данной диссертационной работы, позволяют утверждать, что для проектирования любой оптической системы, базирующейся на бесцветном оптическом стекле, в современных САПР ОС достаточно использовать пятьдесят три марки оптического стекла из более чем ста двадцати, представленных в ГОСТ 3514–94. При дальнейшем уменьшении числа марок стёкол, используемых для проектирования оптических систем, происходит преобладание в перечне так называемых «особых» стёкол, характеризующихся уникальными оптическими характеристиками, высокой стоимостью и низкой технологичностью по сравнению с обычными марками стёкол.

2. Анализ оптических систем отечественных и зарубежных производителей, спроектированных на основе бесцветного оптического стекла и приведенных в открытых литературных и патентных источниках, позволяет заключить, что, во–первых, при замене марок стёкол на стёкла отечественного производства из ограниченного (оптимизированного) перечня в рассматриваемых системах сохраняются исходные качественные характеристики; во–вторых, появляется возможность расширения номенклатуры действительно необходимых марок стёкол за счёт анализа потребностей рынка в марках стёкол, отсутствующих в отечественном производстве.

3. Проведённая работа позволила разработать алгоритм экстраполяции температурных зависимостей показателей преломления отечественных марок стёкол в спектральном диапазоне от 365 до 2325,4 нм по малому числу замеренных (известных) значений, определённых для видимой области спектра.

Представленные в диссертации минимизированный «машинный» каталог оптического бесцветного стекла и программу ПАЗС можно **рекомендовать** оптикам - проектировщикам как вспомогательный инструмент проектирования оптических систем. Кроме этого, проведённые исследования выявили потребность в расширении номенклатуры технологичных оптических стёкол с «особыми» свойствами, которые позволят повысить качественные характеристики разрабатываемых оптических систем при одновременном сокращении общей номенклатуры оптических материалов.

Перспективы дальнейшего развития диссертационного исследования можно разделить на теоретические и прикладные.

К теоретическим можно отнести:

– развитие диссертационного исследования на оптические системы и материалы, предназначенные для работы в других спектральных диапазонах (УФ и ИК);

– разработка эффективной методики оптимизации набора стёкол в разрабатываемых оптических системах с использованием «машинных» каталогов оптических материалов (опираясь на труды профессора Г.Г. Слюсарева, профессора Д.Д. Максутова, С.В. Трубко, В.Г. Резника) на всех этапах проектирования.

К прикладным можно отнести:

– создание обновляемой обширной базы оптических систем, построенных только на отечественной номенклатуре оптических материалов;

– интеграция представленных алгоритма и каталога оптических материалов с другими САПР ОС;

– расширение номенклатуры отечественных марок стёкол за счёт добавления марок с уникальными оптическими свойствами;

– формирование обновляемого «машинного» каталога марок бесцветного оптического стекла отечественного производства.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Малькин А.А.** Алгоритмы расчёта оптических систем с использованием ограниченного перечня марок стёкол/А.А. Малькин. – Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка, вып.4, 2014. – с. 113–119.

2. Пат. 2545465 Российская федерация, МПК[7] G02B 9/60, G02B 11/30. Светосильный объектив/ Малькин А.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла».– №2013142872/28; заявл. 23.09.2013; опубл. 27.03.2015, Бюл. №9. – 6с.: ил.

3. Пат. 2560748 Российская федерация, МПК[7] G02B 9/60, G02B 11/30. Светосильный объектив/ Малькин А.А., Грудзино Ю.Б.; заявитель и патентообладатель АО «Лыткаринский завод оптического стекла». – №2014123180/28; заявл. 09.06.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. №23. – 6с.: ил.

4. **Малькин А.А.** Методы минимизации номенклатуры бесцветного оптического стекла/А.А. Малькин. – СПб.: Сборник трудов VIII Международной конференции молодых учёных и специалистов «Оптика – 2013» [Электронный ресурс], НИУ ИТМО, 2013. – с. 354–357. – Режим доступа: http://conf–opt.ifmo.ru/files/Optics2013_materials.pdf

5. **Малькин А.А.** Определение температуного изменения показателя преломления отечественных марок стёкол в современных САПР по расчёту оптических систем/А.А. Малькин – М.: Сборник трудов XXIII Международной научно–технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, ОАО «НПО «Орион», 2014. – с. 137–141.

6. **Малькин А.А.** Исследования по разработке оптических систем с использованием минимизированного каталога оптического стекла/ А.А. Малькин – М.: Сборник статей по итогам научно-технических конференций.

– Выпуск 7 – В 2-х частях. – Ч. II. – М.: МИИГАиК, Приложение к журналу Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка» № 6, 2014. – с.54–56.

7. **Малькин А.А.** Моделирование температурной зависимости показателей преломления отечественных марок стёкол в программе ZEMAX/А.А. Малькин – М.: Научно-технический журнал «Контенант», Том 14, №1, 2015. – с.3–7.

8. **Малькин А.А.** Применение ограниченной номенклатуры марок стёкол при проектировании оптических систем/ А.А. Малькин – М.: Сборник трудов XI Международной конференции «Прикладная оптика-2014», Оптическое общество им. Д.С. Рождественского, том 2, 2014. – с.146–149.

9. **Малькин А.А.** Аппроксимация показателей преломления оптического бесцветного стекла отечественного производства/А.А. Малькин. – СПб.: Сборник трудов VIII Международной конференции Фундаментальные проблемы оптики - 2014» [Электронный ресурс], Университет ИТМО, 2014. – с.375–378. – Режим доступа: http://conf-bpo.ifmo.ru/files/2014_materials.pdf

10.**Малькин А.А.**, Фуфурин В.В., Шмидт А.И. Опыт разработки объективов для телевизионных камер и приборов ночного видения с применением ограниченной номенклатуры марок стёкол/ А.А. Малькин, В.В. Фуфурин, А.И. Шмидт – М.: Сборник трудов Научно–практической конференции «Оптико-электронные комплексы наземного и космического базирования», ОАО ЛЗОС, 2014. – с.84–86.