ЧПОУ «СККИТ»

Теория и расчёт оптических систем

От классической геометрической оптики к современным методам автоматизированного расчёта: аберрации, допуски, freeform- и метаповерхностная оптика.

ГЛОССАРИЙ

Оптическая система

[сущ. · прикладная оптика]

> Совокупность линз, зеркал, призм, диафрагм и приёмников, формирующая изображение с заданным качеством. Расчёт связывает требования ТЗ с конструкцией и допусками.

Пример: по ТЗ на объектив 50 мм с полем 40° расчёт подбирает число линз, материалы и допуски так, чтобы волновой фронт укладывался в λ/4.

ТЕОРИЯ И РАСЧЁТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Идеальная оптическая система: кардинальные элементы

Оптическая сила Φ — основная характеристика идеальной системы; f' — заднее фокусное расстояние, n и n' — показатели преломления сред, R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхностей.

$$\Phi = \frac{1}{f'} = (n' - n)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

Φ	Оптическая сила системы	дптр ($м^{-1}$)
f'	Заднее фокусное расстояние	м
$\beta = \frac{f'}{l}$	Линейное увеличение	безразмерное
n, n'	Показатели преломления сред	безразмерные

Формула справедлива для параксиальных лучей в приближении тонкой линзы; главные плоскости H и H' совпадают с линзой.

ГОСТ 7427-76, параксиальная оптика

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ИНВАРИАНТЫ

Закон Снеллиуса и инвариант Аббе

Закон преломления на границе сред и инвариант Аббе n\,y\,\sin u = \text{const} задают предельные апертуры реальных систем.

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

n_1, n_2	Показатели преломления сред	–
θ_1, θ_2	Углы падения и преломления	град
$n\,y\,\sin u$	Инвариант Аббе (условие синусов)	const
$NA = n \sin u$	Числовая апертура системы	0,1–0,9

Условия синусов и Гюйгенса ограничивают апертуру: при больших NA аберрации растут.

ГОСТ 7427-76, прикладная оптика

Аберрации: виды, проявления и способы коррекции

Вид аберрации	Проявление	Способ коррекции
Сферическая аберрация	Краевые лучи фокусируются ближе к линзе, чем параксиальные; изображение точки размывается	Асферические поверхности, склейка положительной и отрицательной линз
Кома	Внеосевые точки дают несимметричное пятно в виде кометы	Апланатические системы, симметричные схемы, асферики
Астигматизм	Лучи в разных меридиональных плоскостях фокусируются в разных точках — точка превращается в отрезки	Анастигматы, цилиндрические и торические компоненты
Кривизна поля	Плоскость наилучшей резкости искривлена — резкость по краям поля падает	Линзы Флинта-Пецваля, полевые линзы, выравнивание поверхности изображения
Дисторсия	Нарушение геометрического подобия: прямые линии искривляются (бочка/подушка)	Симметричные схемы, подбор положения диафрагмы, цифровая коррекция
Хроматизм положения	Фокусы разных длин волн не совпадают — изображение окрашено по контуру	Ахроматы и апохроматы, склейки из стёкол с разной дисперсией
Хроматизм увеличения	Разный масштаб изображения для разных длин волн — цветная кайма	Апохроматы, комбинации стёкол, вычислительная коррекция

ПРОЦЕСС

Этапы расчёта оптической системы

1

Габаритный расчёт и выбор схемы

Задаём фокусные расстояния, увеличение, положение зрачка и апертуру. По ним выбираем схему: линзовую, зеркальную или зеркально-линзовую.

2

Аберрационный расчёт

Считаем монохроматические и хроматические аберрации, строим графики, функцию рассеяния точки и ЧКХ. Выявляем доминирующие искажения.

3

Оптимизация и оценка допусков

Минимизируем целевую функцию по радиусам, толщинам и материалам. Затем считаем допуски и проверяем устойчивость методом Монте-Карло.

4

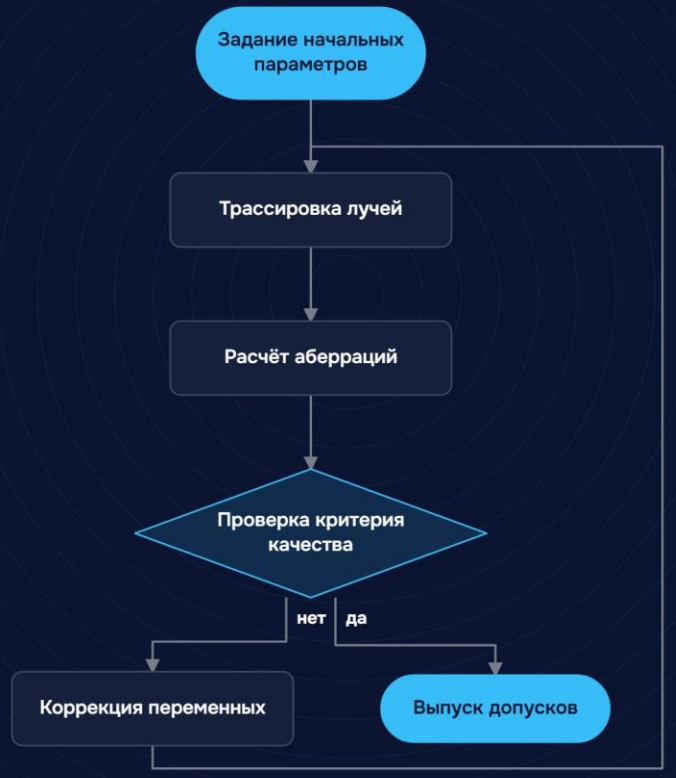
Технологическая подготовка

Выпускаем чертежи по ISO 10110, назначаем покрытия и материалы, выбираем методы контроля волнового фронта. Итог — документация для производства.

Источник: методы расчёта оптических систем, 2025

МЕТОДИКА РАСЧЁТА

Алгоритм аберрационного расчёта с проверкой качества



Критерий останова: RMS-радиус пятна и MTF в пределах допуска на изготовление и юстировку.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

Методы расчёта: от аналитики до численной оптимизации

+ Плюсы

Аналитические формулы тонких компонентов: мгновенная оценка фокусных расстояний и габаритов на старте проекта

Метод параксиальных лучей: быстрый расчёт хода лучей вблизи оси, удобен для габаритного расчёта и оценки увеличения

Точная трассировка реальных лучей: расчёт по законам Снелла даёт истинный ход лучей и все аберрации системы

Автоматическая оптимизация (градиентные и глобальные алгоритмы): поиск лучшей конфигурации по функции качества в Zemax, CODE V

− Ограничения

Не учитывают толщины линз, аберрации и реальные материалы — годятся лишь для первого приближения

Справедлив только для малых углов и идеальной системы — не описывает реальные пучки и полевые аберрации

Трудоёмка вручную, требует численных методов и больших вычислений для тысяч лучей и полей

Результат зависит от начальной точки и выбора функции качества; возможны локальные минимумы и долгий счёт

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Zemax OpticStudio и CODE V: два стандарта расчёта

Критерий	Zemax OpticStudio	CODE V
Разработчик	Ansys (Synopsys)	Synopsys (Keysight)
Оптимизация	Локальная и глобальная	Быстрая глобальная, эталон для сложных систем
Допускный анализ	Monte Carlo, допуски	Monte Carlo, эталон для ответственных систем
MTF и аберрации	Полный набор	Полный набор
Паразитный свет	Сильный несеквенциальный режим	Ограниченный несеквенциальный режим
Асферика и freeform	Поддержка	Поддержка
Новое в 2026	AI-инструменты, интеграция с CAD	CODE V 2026: ИИ-подбор стартовых точек
Типичная сфера	Освещение, LiDAR, HUD, сенсорика	Аэрокосмос, оборона, широкопольная съёмка

Оба пакета проектируют и считают допуски почти любой системы; выбор решают процесс и экосистема команды.

Источник: Palo Alto Optics, 2026; Keysight CODE V 2026

СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Freeform-оптика и метаповерхности: что меняется в расчёте

Свободные формы снимают ограничение осевой симметрии: поверхности задаются полиномами XY и укладывают коррекцию аберраций в компактную схему. Метаповерхности заменяют линзы плоскими наноструктурами — в 2026 году они выходят в камеры смартфонов и LiDAR. Расчёт переходит от осесимметричных формул к численной оптимизации тысяч параметров.

- Ключевой сдвиг: вместо аналитического расчёта — оптимизация и допусковый анализ в Zemax OpticStudio / CODE V



Nature, 2026; Ansys Zemax OpticStudio / Keysight CODE V, 2026

КЛАССИКА

Склейки, асферика, диафрагмирование

— Аберрации исправляются подбором стёкол и формой поверхностей — каждая новая схема считается заново

— Адаптивная оптика требует датчика волнового фронта и механики — громоздко и дорого

— Диафрагмирование снижает аберрации ценой светосилы и разрешения

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО

Адаптивная оптика и нейросетевая коррекция

+ Нейросети (CAC) обобщаются на разные объективы: одна модель вместо переобучения под каждую линзу

+ Бессенсорные адаптивные системы компактнее, дешевле и проще в установке

+ Вычислительная коррекция сохраняет светосилу, исправляя искажения на этапе обработки

Источники: arXiv, Nature Methods, ScienceDirect, 2026

ПРИМЕР РАСЧЁТА

Двухлинзовый объектив: от исходных данных к качеству изображения

1

Исходные данные

Фокусное расстояние f' = 100 мм, относительное отверстие 1:4, поле зрения 2ω = 20°. Задаём спектральный диапазон и требования к качеству изображения.

2

Выбор материалов

Подбираем пару стёкол с разными показателями преломления и дисперсией — крона и флинта — для компенсации хроматических аберраций.

3

Расчёт радиусов

Из условий масштаба и коррекции аберраций определяем радиусы кривизны поверхностей и толщины линз, проверяем ход лучей.

4

Оценка аберраций и вывод

Анализируем остаточные сферическую и хроматическую аберрации, строим пятно рассеяния и делаем вывод о пригодности системы.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА

Критерии качества и допуски оптической системы

RMS-радиус пятна рассеяния

RMS-радиус пятна

Среднеквадратичный размер изображения точки

MTF

MTF на заданной частоте

Контраст на пространственной частоте, лин/мм

Энергетическая концентрация

Допуски изготовления

Допуски: радиусы, толщины

Децентрировка и показатели стёкол — рост себестоимости

ФИНАЛ

Спасибо за внимание!

Расчёт оптики — итерация: габаритный синтез, оптимизация, допуски.

Тренды 2026: ИИ-оптимизация, freeform, метаповерхности.