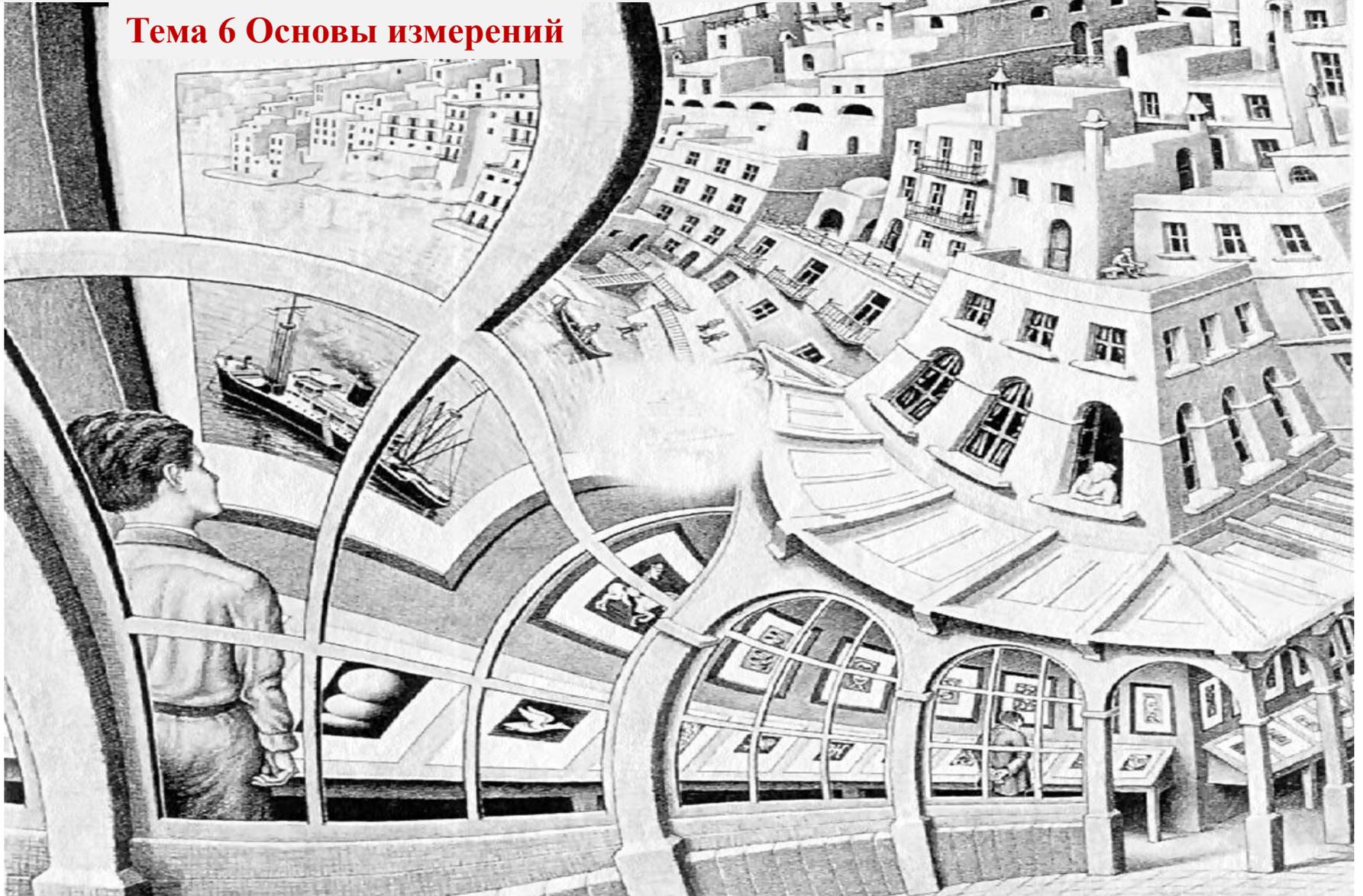


# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

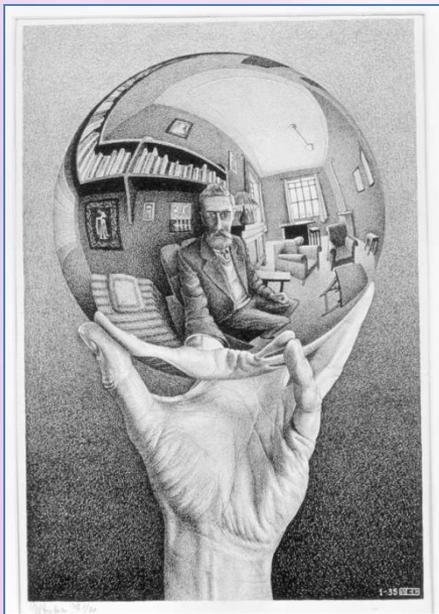
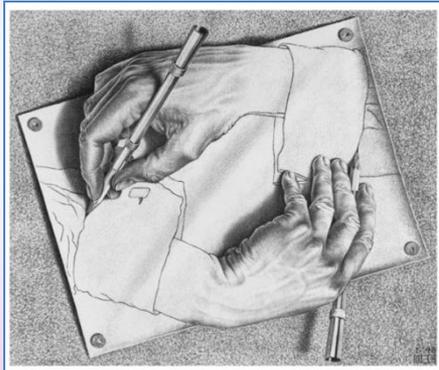
## Тема 6 Основы измерений



*Морис Корнелис Эшер - Maurits Cornelis ESCHER - Парадоксаль*

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



- 1 Общие методы и средства измерений.
- 2 Классификация методов измерения.
- 3 Измеряемые величины.
- 4 Характеристики фотометров.
- 5 Градуировка фотометров.
- 6 Измерение характеристик оптических систем (методы, схемы, обработка данных): фокусных расстояний, увеличения, апертур, дисторсии, светопропускания, aberrаций, децентрировки.
- 7 Измерения aberrаций оптических систем: теневой метод Фуко, метод Гартмана.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



Успешная работа исследователя в оптической измерительной лаборатории зависит не только от хорошей оснащённости современными приборами, но и от знания и применения теоретических и практических аспектов современных оптических измерений, их возможностей и перспектив.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

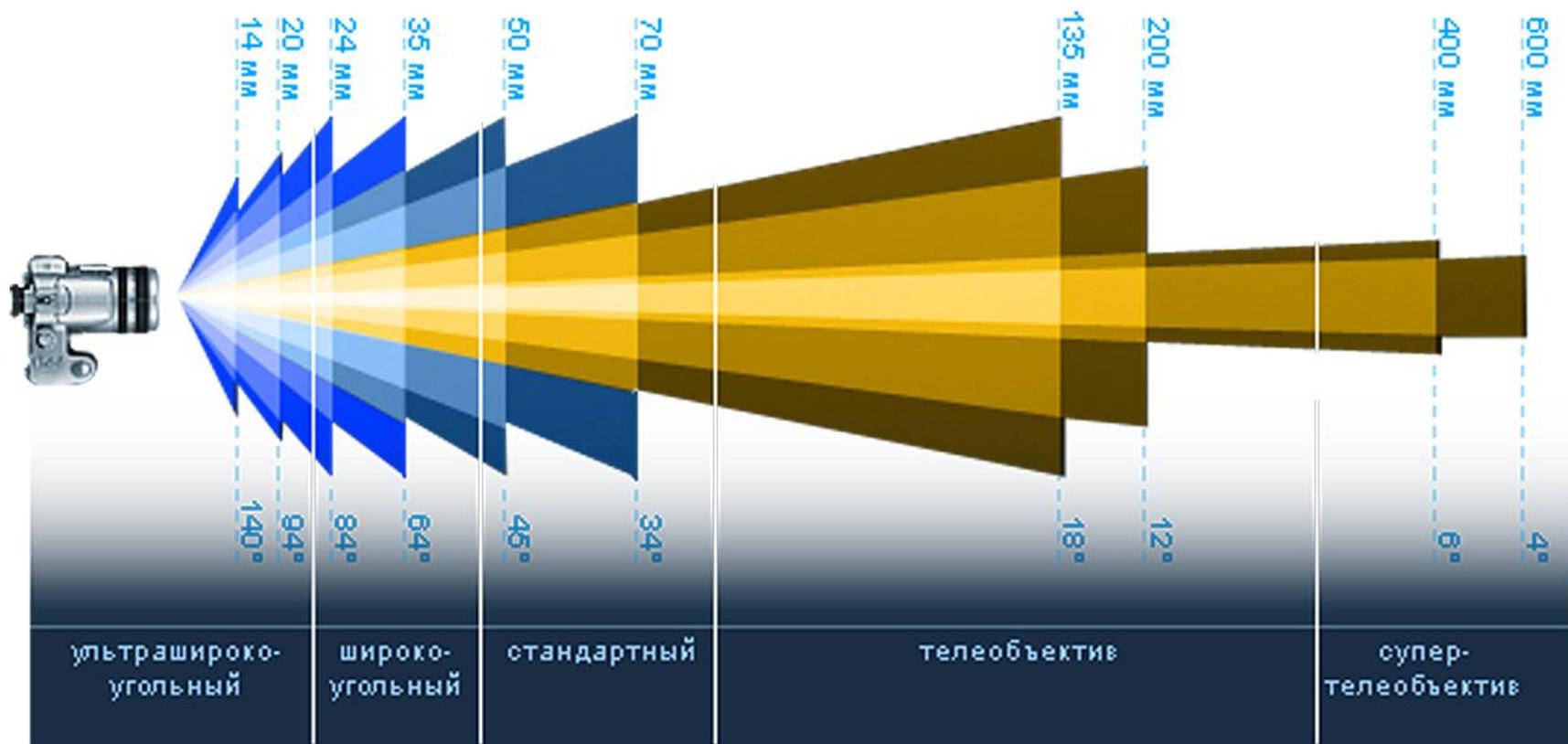
Большинство оптических систем, формирующих действительное изображение, можно отнести к *фотографическим объективам*.

Требования к качеству и информативности регистрируемых изображений непрерывно растут, поэтому совершенствуются и объективы различного назначения.



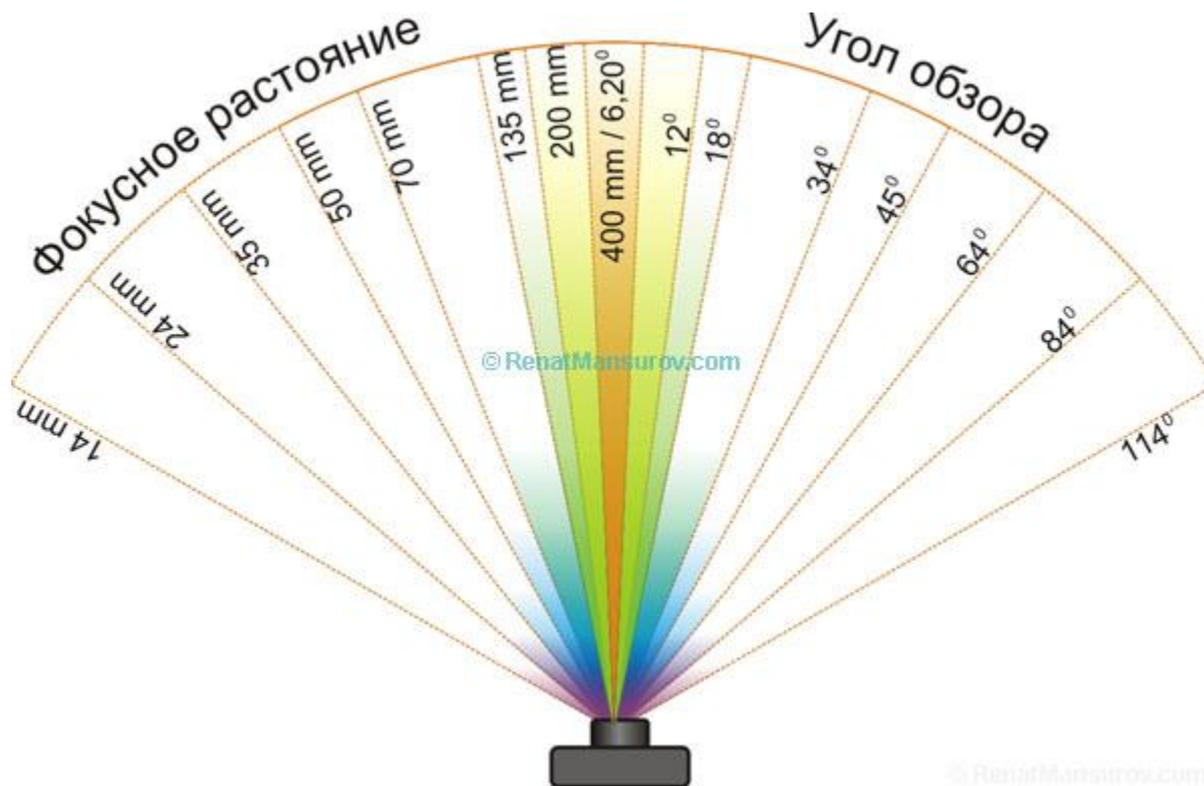
# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



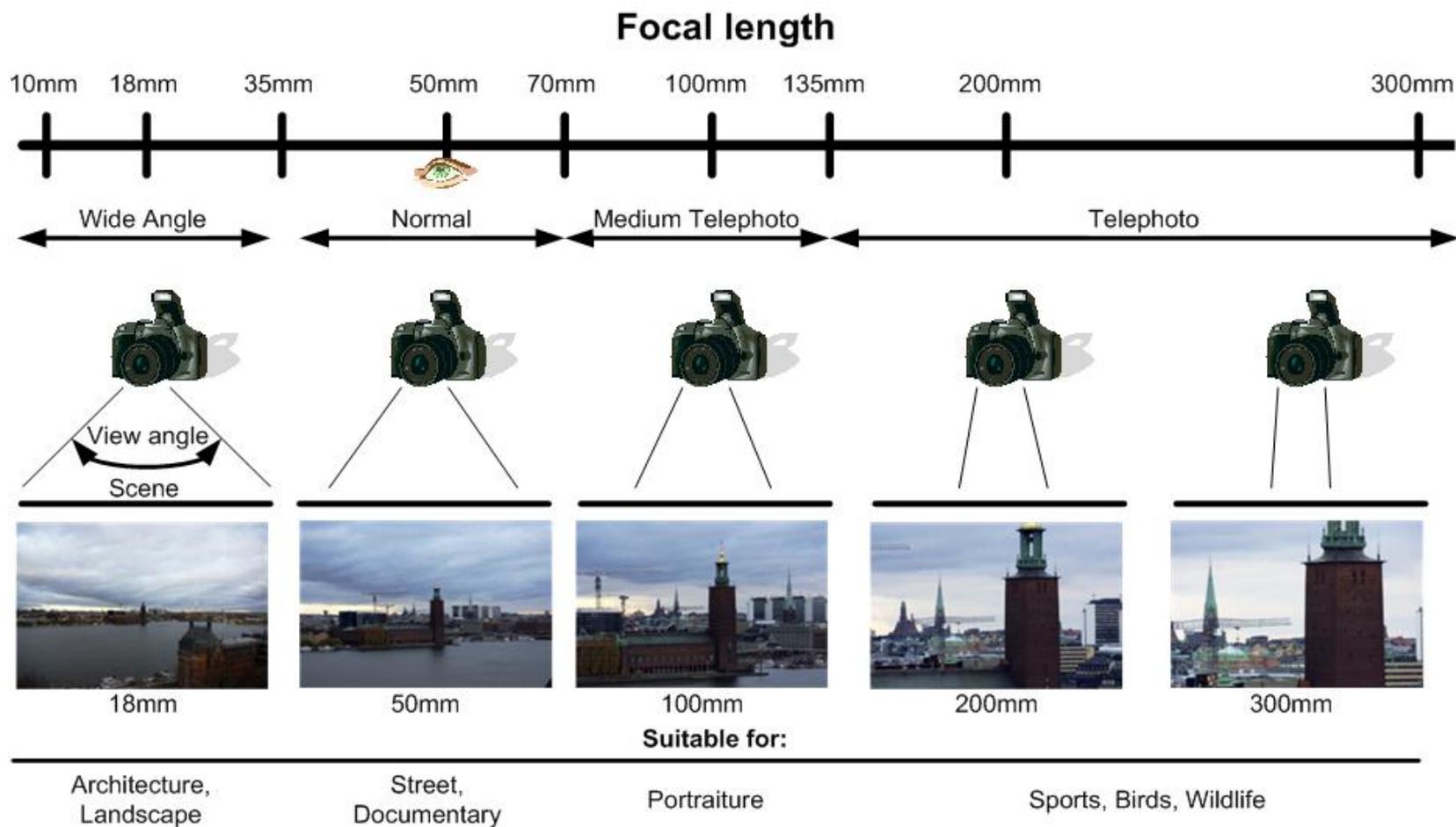
# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



Ошибки изготовления оптической системы в настоящее время соизмеримы с погрешностями методов контроля характеристик оптических систем. Поэтому дальнейшее совершенствование качества современных оптических систем связано с проблемой совершенствования методов их контроля.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



При наличии погрешностей изготовления оптических элементов и юстировки оптических систем формируемое ими изображение искажается вследствие аберраций



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



Аберрации бывают симметричные (например, сферическая аберрация, дисторсия) и асимметричные (кома)



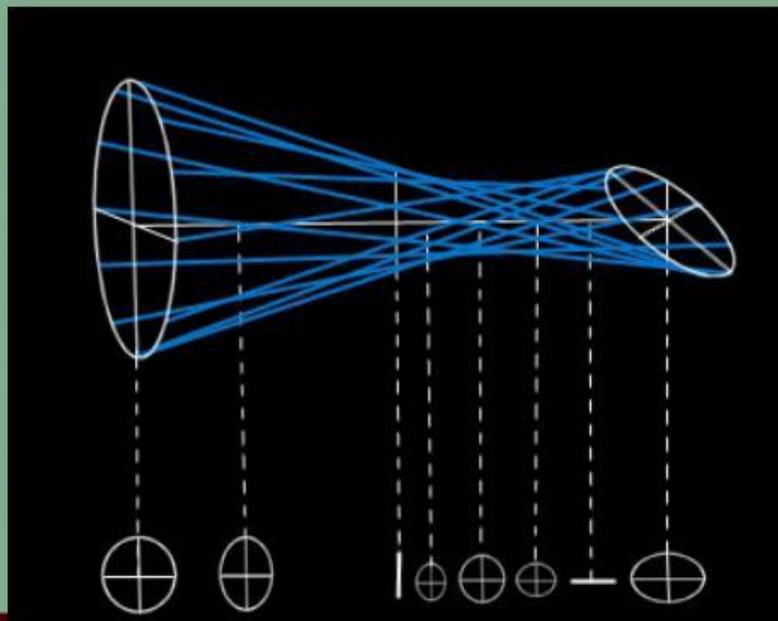
# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### Астигматизм

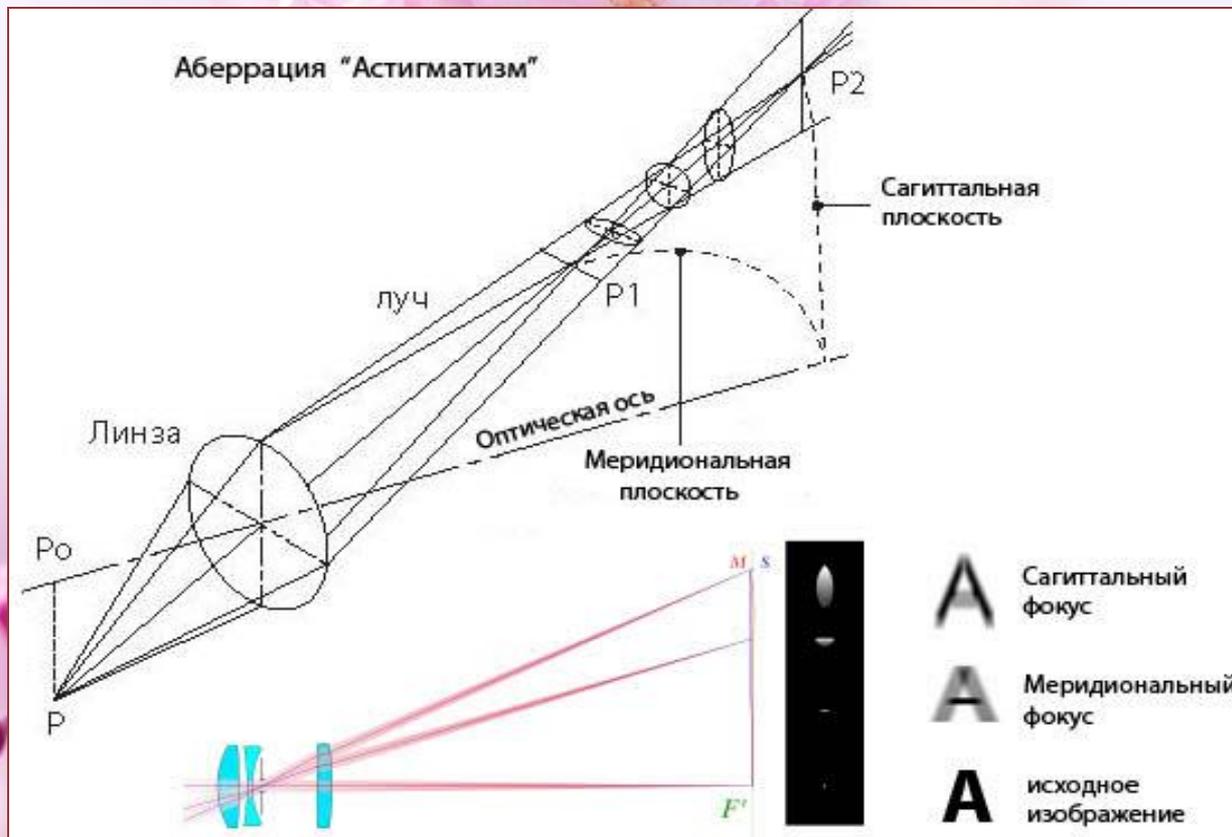
**Астигматизм** - изображение точки, удалённой от оптической оси, представляет собой не точку, а две взаимно перпендикулярные линии, лежащие в разных плоскостях.

Аберрация астигматизм характеризуется тем, что лучи от объекта собираются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях изображения, которые разнесены друг от друга на некоторое расстояние.



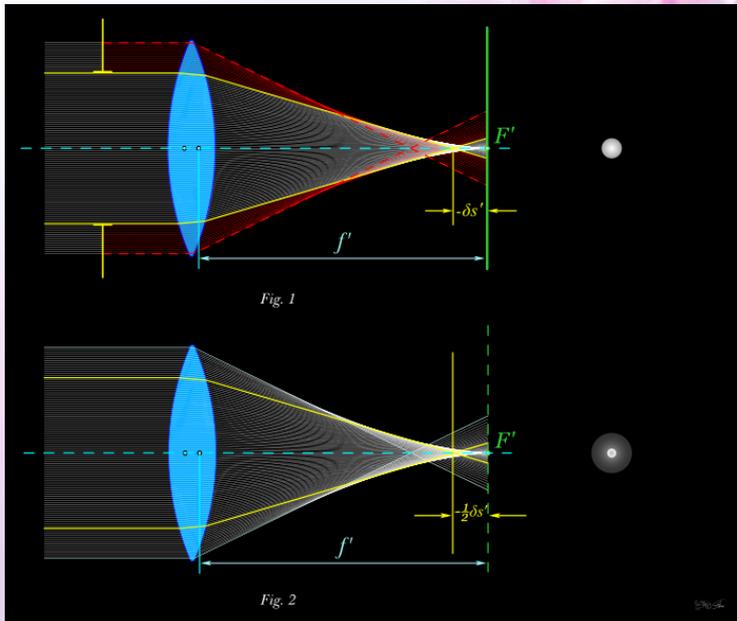
# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

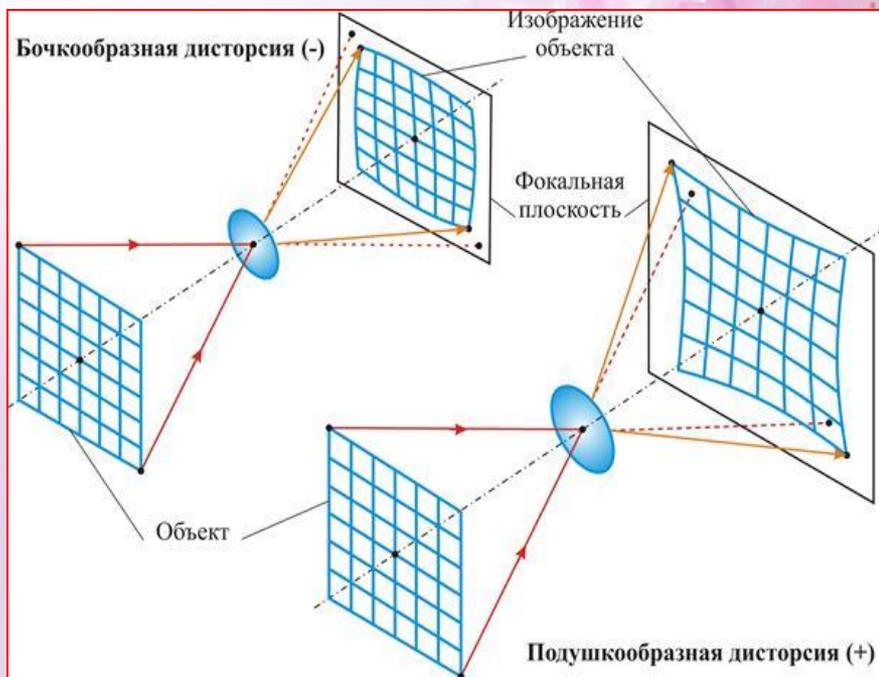
## Тема 6 Основы измерений



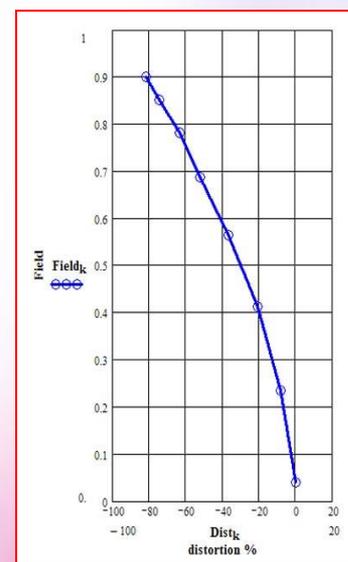
Наличие ореолов – признак остаточной *сферической* *абберации*. Определяя, при каком диаметре отверстия диафрагмы исчезают ореолы, можно определить величину отверстия объектива, исправленного в отношении сферической абберации

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

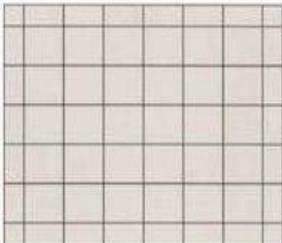
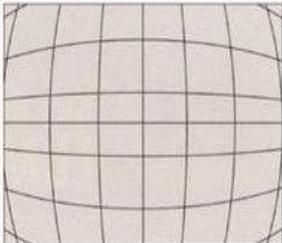
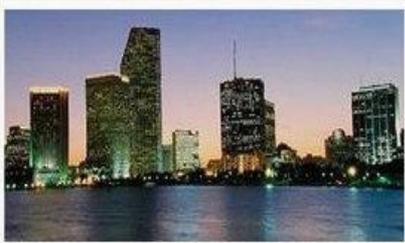
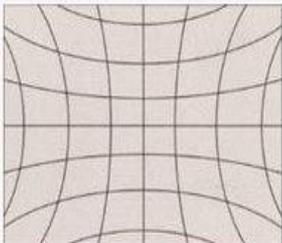


Причина дисторсии – непостоянство линейного увеличения объектива во взаимно перпендикулярных направлениях в разных участках поля зрения



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

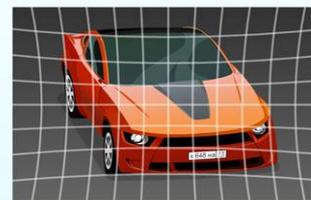
## Тема 6 Основы измерений

		Реальное изображение
		<b>Бочкообразная дисторсия</b> , когда изображение по краям «выгибается» наружу
		<b>Подушкообразная дисторсия</b> , когда линии будто проваливаются в центр изображения

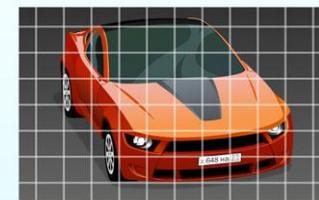


### Компенсация геометрических искажений объектива

Исходное изображение



Искажения объектива компенсированы



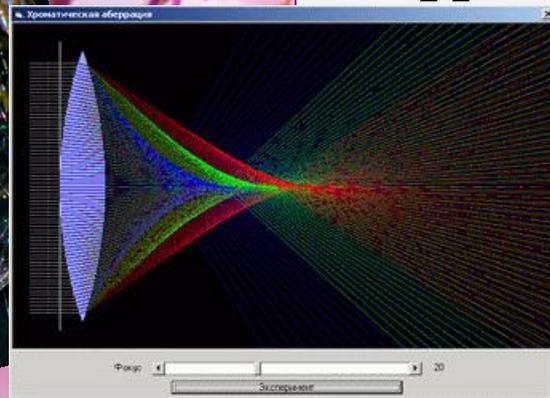
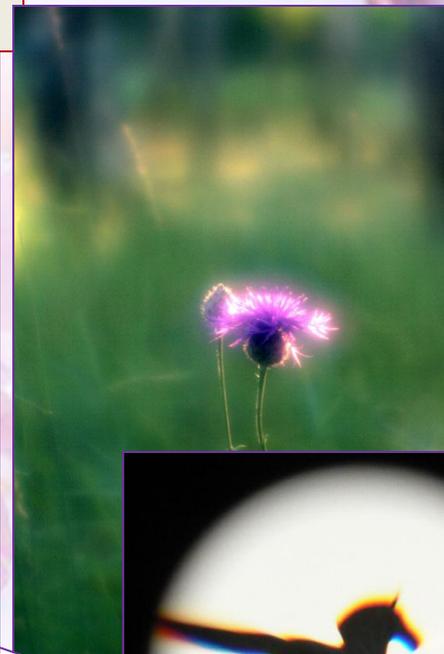
# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

X.A.

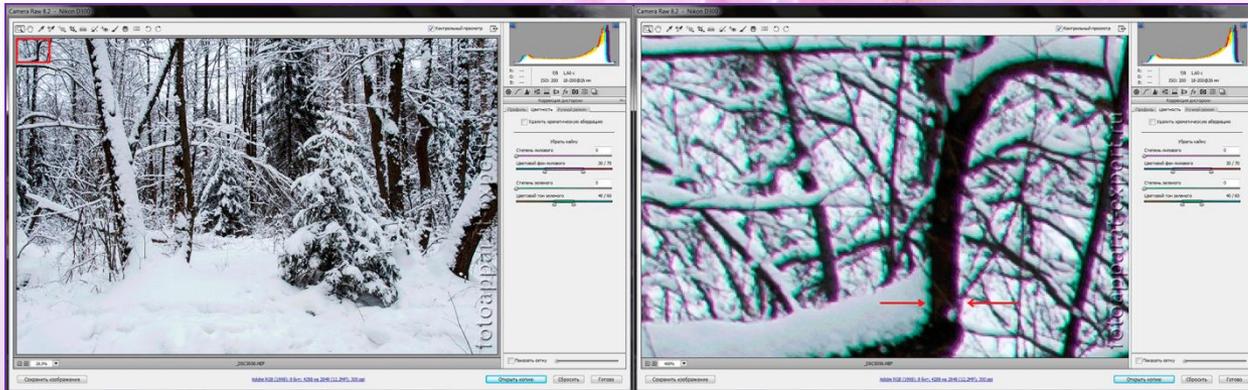


Наличие  
у краев  
изображения  
цветной каймы —  
признак  
остаточной  
*хроматической*  
*аберрации*

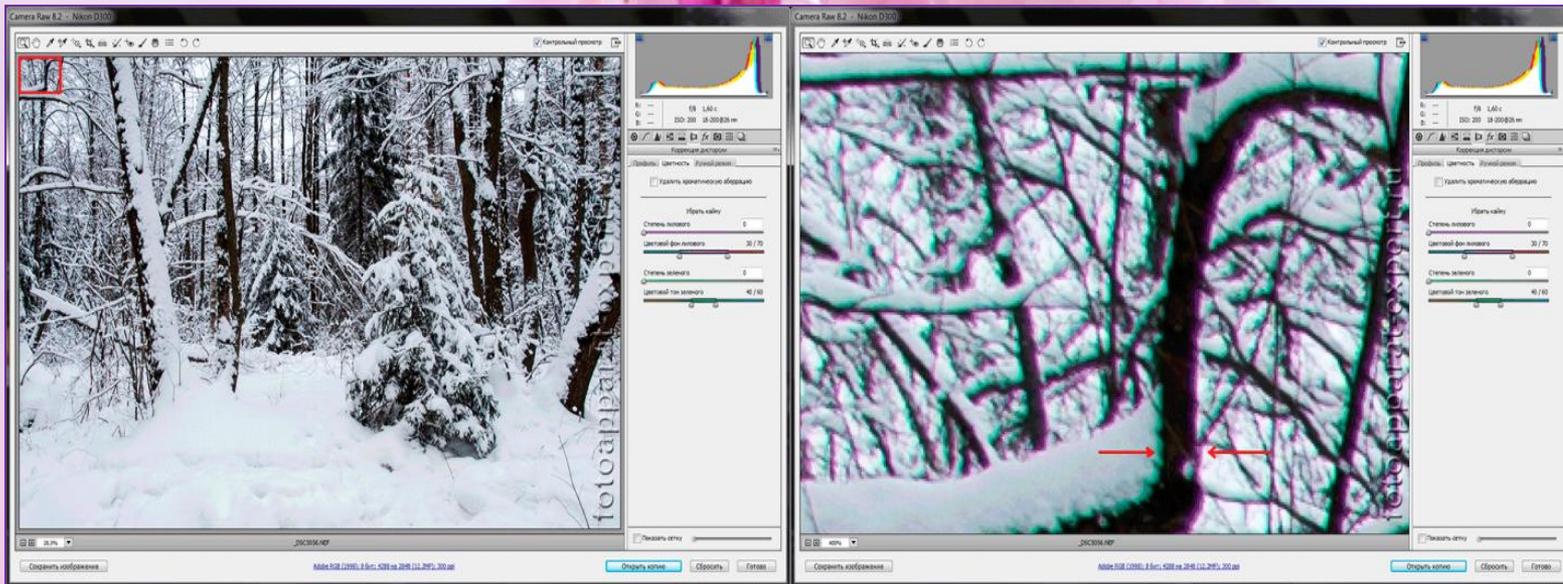


# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



Хроматическая  
абберация более  
заметна на  
фотографиях при  
большем  
увеличении

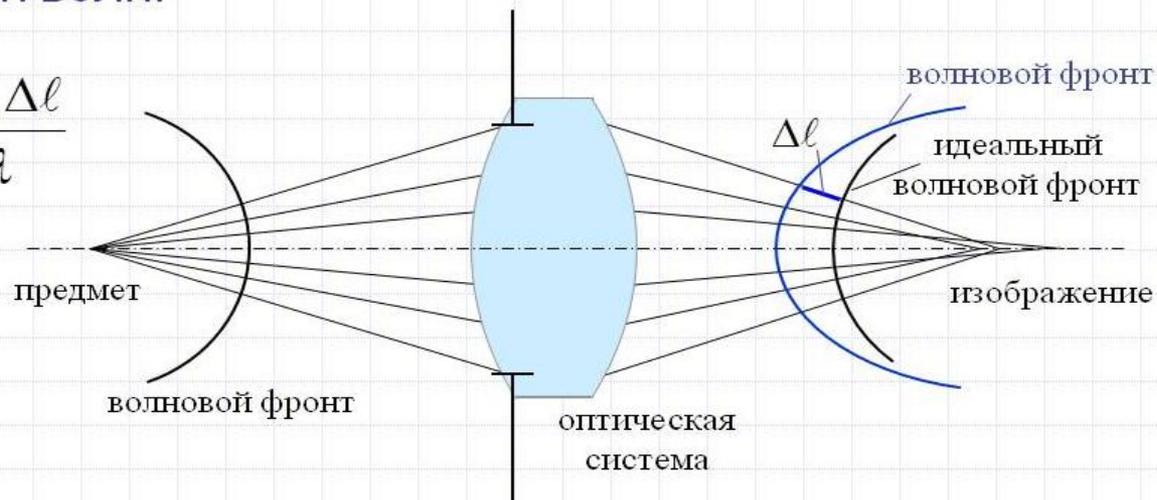


# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

- ◆ **Волновая абберация** – это отклонение выходящего волнового фронта от идеального, измеренное вдоль данного луча в количестве длин волн:

$$W = \frac{n' \cdot \Delta l}{\lambda}$$



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

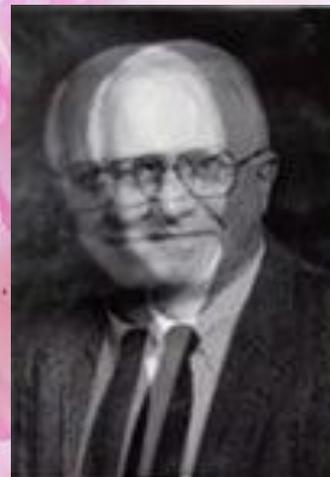
*Виньетирование* – снижение яркости изображения от центра к краям фото, обусловленное срезанием наклонно падающих лучей виньетирующими диафрагмами



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

Результатом несовершенной центрировки оптической системы объектива может быть эффект раздвоения изображения

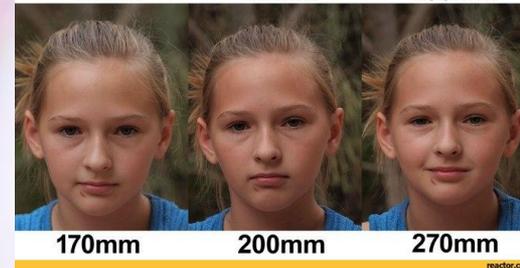
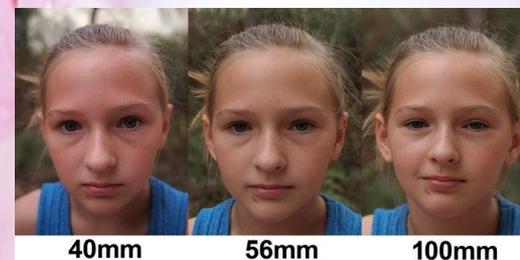


Н. Н. ГУБЕЛЬ  
АБЕРРАЦИИ  
ДЕЦЕНТРИРОВАННЫХ  
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



*Ракурс один,  
объективы разные*



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

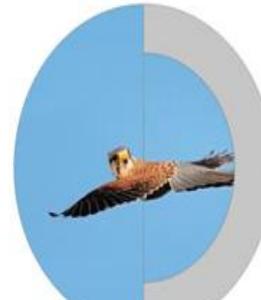
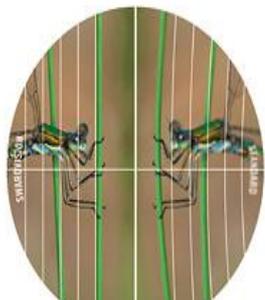
## Тема 6 Основы измерений

Ракурс  
при фотосъемке  
очень важен



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



### *Цели создателей оптических приборов и пользователей едины:*

Отсутствие искажений  
изображения по всему  
полю зрения

Четкость и высокий  
контраст при отсутствии  
аббераций

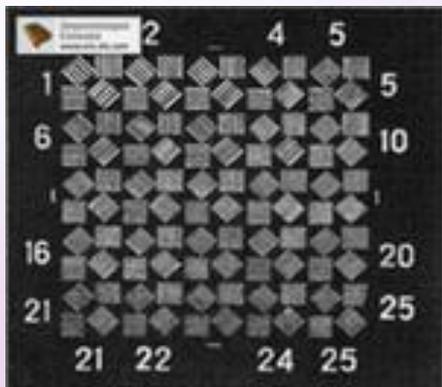
Правильное воспроизведение  
цветов и высокая яркость  
изображения

Широкий угол обзора  
при большом оптическом  
увеличении



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



Традиционные методы контроля оптических характеристик объективов, определяющих качество изображения, во многом основаны на визуальных оценках. Для оценки передающих свойств объектива широко используется *измерение разрешающей способности* – традиционного и наиболее распространенного критерия качества оптических приборов.

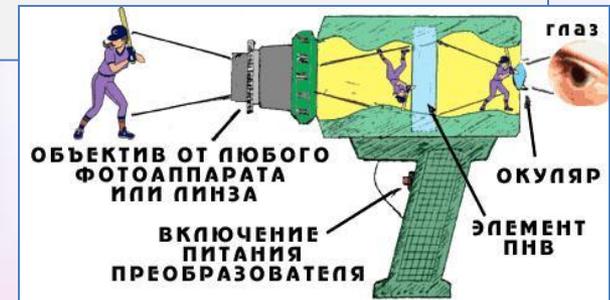
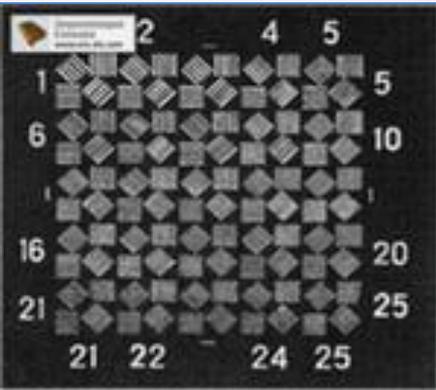
Оценка качества изображения и разрешающей силы производится на оптической скамье с помощью штриховой линейной миры. Хорошо исправленный объектив-анастигмат при полной диафрагме должен формировать резкое изображение миры на полностью черном фоне без ореола, белесоватого фона, без раздвоения, окрашивания и искажения рисунка миры.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

Для оценки разрешающей силы объектива выбирают тот квадрат миры, в изображении которого можно свободно различить светлые и темные полосы, ориентированные в разных квадратах по разным направлениям, и определить их количество.

В современных условиях определения *только разрешающей способности и только визуальными методами* недостаточно для оценки качества изображения и формирующей его *оптической системы*. Современные методы контроля развиваются в таких направлениях, чтобы исключить зависимость результатов измерения от психофизиологических особенностей и зрения наблюдателя и обеспечить возможность измерений и за пределами видимой области спектра.

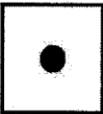
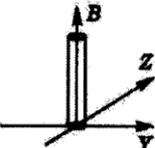
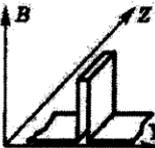
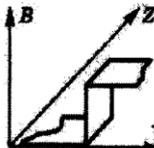
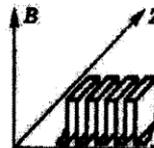
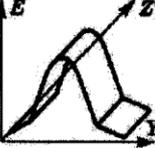


# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

На начальных этапах контроля качества изготовленных оптических систем оценки выполнялись преимущественно качественно, по виду изображения того или иного тест-объекта, начиная с объекта «светящаяся точка». При этом оценку качества изображения производили визуально, без измерения каких-нибудь параметров или характеристик изображения.

Таблица 1. Типовые тест-объекты и характеристики качества изображения

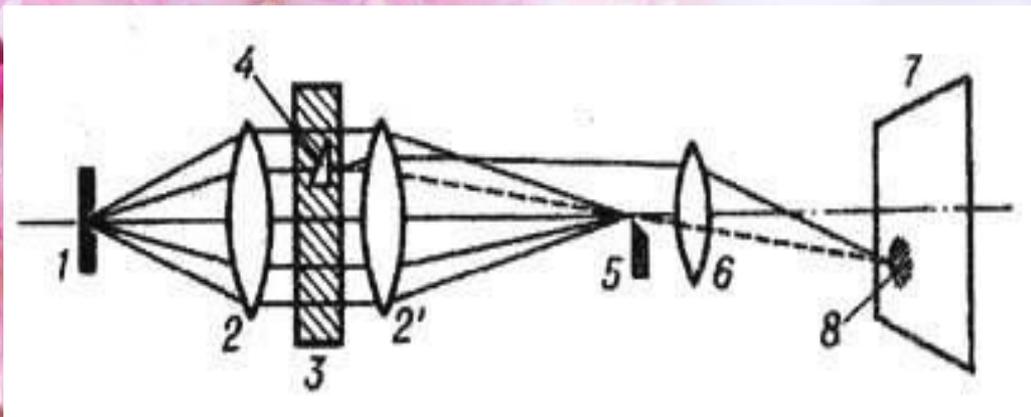
	Светящаяся точка	Светящаяся линия	Полуплоскость	Линейная решетка
Тест-объект				
Функция распределения яркости в объекте				
Изображение тест-объекта				
Функция распределения интенсивности в изображении				
	Функция рассеяния точки (ФРТ)	Функция рассеяния линии (ФРЛ)	Пограничная функция	Распределение интенсивности в изображении решетки

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



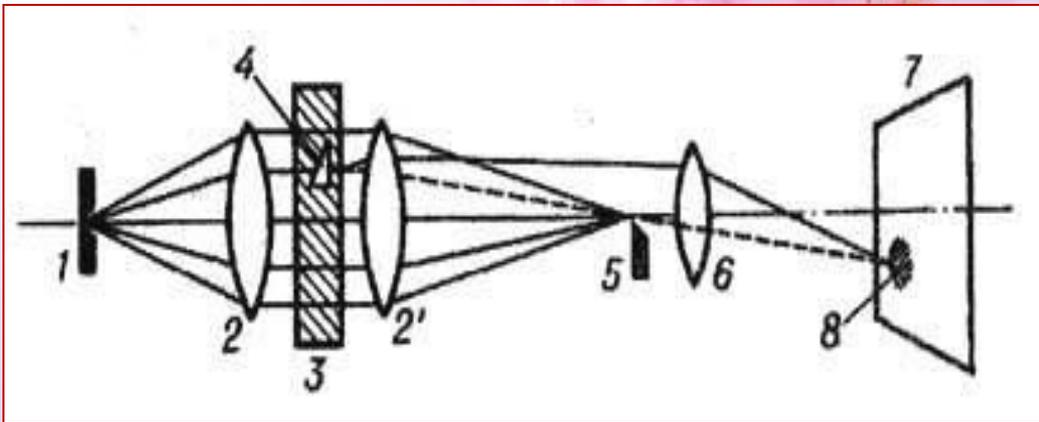
**Фуко Жан  
Бернар Леон**  
(1819 – 1868),



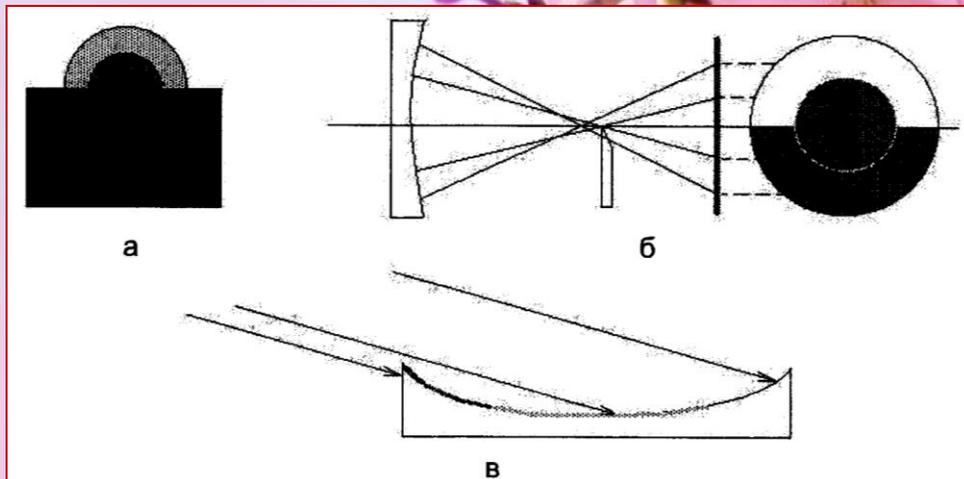
впервые предложивший метод исследования деформаций волнового фронта, связанных с aberrациями оптических систем и ошибками в изготовлении оптических элементов, совершил революцию в оптическом контроле и измерениях.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



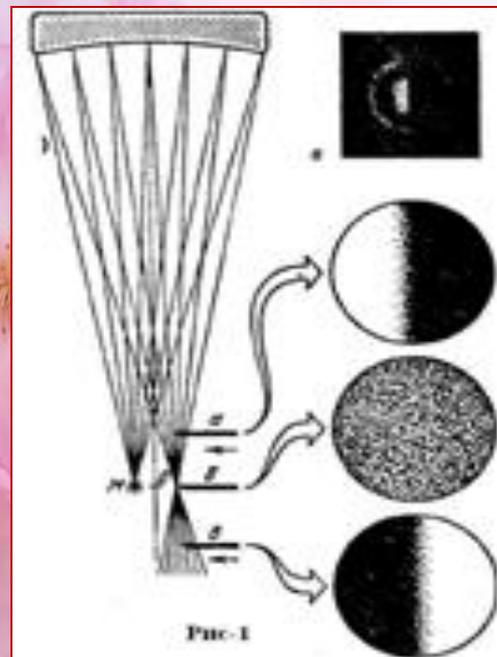
Для получения теневой картины деформаций исследуемого волнового фронта, соответствующих aberrациям оптической системы или ошибкам оптической поверхности, в плоскости схождения параксиального пучка лучей устанавливается перпендикулярно оптической оси непрозрачный экран с прямолинейным краем («нож Фуко»), который наполовину перекрывает пятно рассеяния



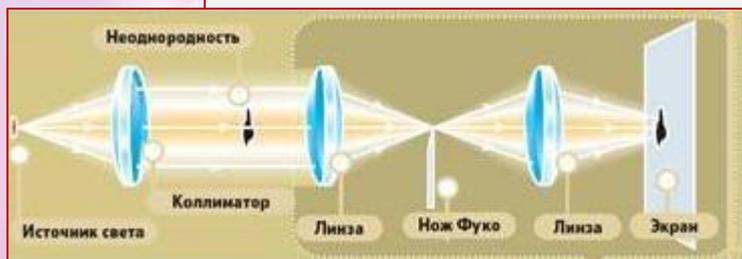
# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

По простоте реализации метод Фуко является уникальным по сравнению с другими оптическими методами и может рассматриваться как первый по-настоящему *производственный способ*, на основе которого были разработаны другие многочисленные варианты оптического контроля.



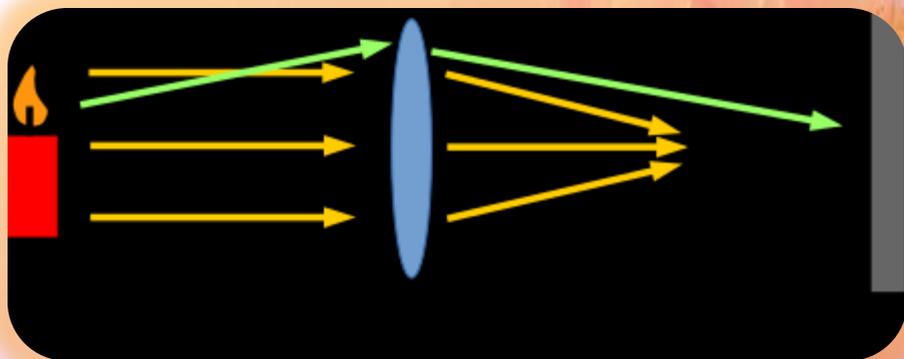
Метод Фуко, усовершенствованный  
Д.Д. Максудовым



Метод Фуко-Тёплера

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



1 – источник света с конвективным воздушным потоком; 2 – линза; 3 – диафрагма (нож Фуко);  
4 – экран

**Схема шлирен-метода  
Фуко -Тёплера (1864)**



**Фотография ударной  
волны пули, полученная  
шлирен-методом (1888)**

По чувствительности шлирен-метод превосходит другие, в том числе интерференционные методы. В некоторых случаях, например, при очень малых градиентах показателя преломления (что характерно в частности для процессов, протекающих в разрежённых газах) метод вообще является единственно возможным из оптических способов

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Достоинства теневого метода:

- впервые получена возможность визуальных наблюдений малых деформаций волнового фронта на выходе из системы;
- высокая (порядка  $0,1 \lambda$ ) чувствительность;
- наглядность (обеспечена возможность наблюдения характера искажений волнового фронта, места расположения, формы, величины и протяженности деформаций волнового фронта и ошибок обрабатываемой оптической поверхности)

## Недостатки теневого метода:

- не преодоленные в полной мере трудности количественной интерпретации теневого изображения, в результате чего метод применяется преимущественно для технологического контроля в форме качественных оценок состояния оптических поверхностей и материалов, а также уровня aberrаций оптических элементов и систем

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

**Основной принцип методов контроля** оптической системы с применением экрана, расположенного вблизи ее выходного зрачка, заключается в том, что волновой фронт оценивается в ряде предварительно выбранных точек, а результаты сравниваются с теоретическими значениями.

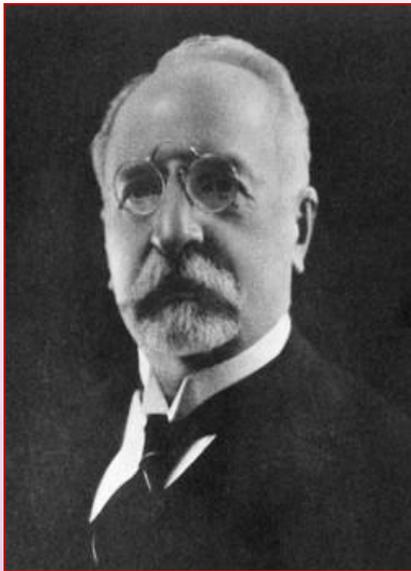
*Методы базируются на законах геометрической оптики.* Идея заключается в том, что при наличии погрешностей волнового фронта в некоторой области фокусировка света происходит в точке, отличающейся от теоретического положения фокуса, или лучи пересекаются с осью в плоскости, не совпадающей с плоскостью, соответствующей идеальному волновому фронту.

В результате анализа погрешности волнового фронта **оценивают**:

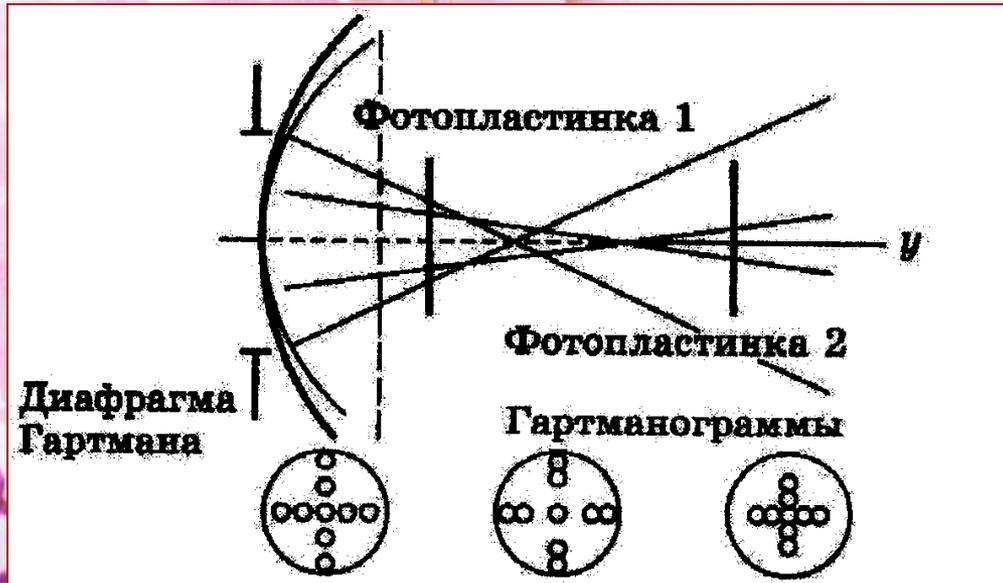
- в какой плоскости вдоль оптической оси пересекаются пучки лучей от некоторой области волнового фронта;
- каково различие в положении этой плоскости и в теоретическом положении точки пересечения лучей для идеальной волны.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



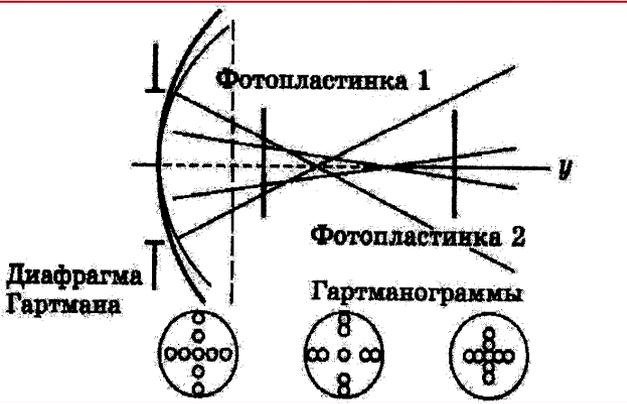
Гартман Иоганнес  
(1865 – 1936)



Метод Гартмана (1904) пригоден для точного количественного измерения различных aberrаций, включая хроматические

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



$$d = (0,005 - 0,0025)f'$$

В выходной зрачок оптической системы устанавливается диафрагма Гартмана – непрозрачная заслонка с серией отверстий. Диафрагма пропускает отдельные пучки лучей, затем выполняется регистрация пучков лучей во внефокальных зонах на фотографических пластинках и исследуется направление хода лучей, обусловленное искажениями волнового фронта. На каждой из пластинок регистрируется *гартманограмма*, на которой зарегистрированы следы пучков лучей, которые пересеклись со светочувствительной площадкой приемника излучения.

Если волновой фронт не деформирован, расположение пятен гартманограммы соответствует расположению отверстий на диафрагме Гартмана. Если имеется деформация волнового фронта (например, как на рисунке), то крайние пятна сгруппируются на краю (как на первой фотопластинке,) или сдвинутся к центру (как на второй фотопластинке). Если измерить расстояние между пятнами, и если известно расстояние до пластинок, то, пользуясь подобием треугольников, можно определить положение точек схождения лучей и пересечения ими оптической оси.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

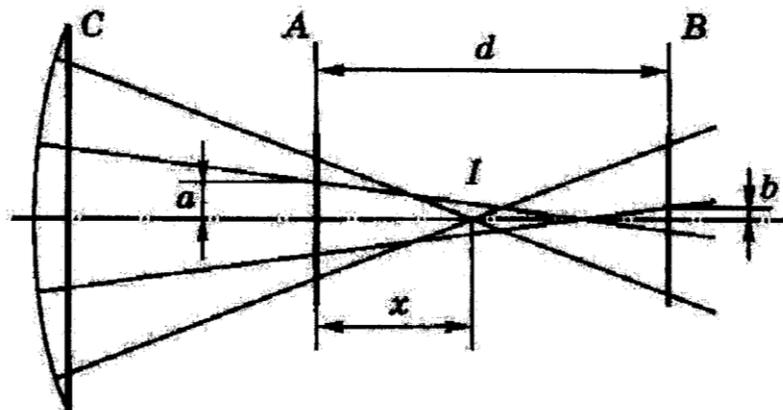
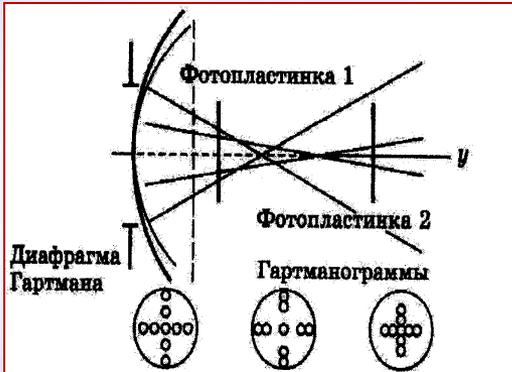


Рис. 10. Схема метода Гартмана:  $d$  – расстояние между предфокальным и зафокальным положениями фотопластинок;  $a$  – расстояние между следом оптической оси и следом данного луча (пятном) на предфокальной фотопластине  $A$ ;  $b$  – соответствующее расстояние на зафокальной фотопластинке

При упрощенном рассмотрении расстояние от  $A$  до точки  $I$  пересечения данного луча с осью может быть найдено по формуле

$$x = \frac{a}{a + b} \cdot d$$

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ



## Метод Гартмана

### Недостатки метода:

- Отсутствие наглядности;
- необходимо измерение координат пятен гартманограммы с точностью порядка 1 мкм с применением дорогостоящей двумерной измерительной машины («Ascorecord»);
- фундаментальный недостаток – пространственная дискретность данных по зрачку, так как метод основан на выделении из ВФ отдельных пучков лучей;
- есть пространственный предел интервала, с которым можно расположить отверстия;
- получается информация только о макродеформациях ВФ; информация о мелкоструктурных деформациях поверхности недоступна;
- вибросочувствительность и обусловленные ею нерезкость пятен гартманограммы и снижение точности измерений

### Достоинства метода:

- возможность количественного определения (измерения) aberrаций и деформаций волнового фронта (ВФ);
- метод прост (используется точечный источник света, диафрагма и две фотопластинки);
- метод пригоден для исследования параметров оптической системы прибора непосредственно по наблюдаемому объекту, то есть в рабочем положении

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для оптического контроля и измерений необходимо использовать экспресс-методы, обеспечивающие точную количественную информацию обо всем исследуемом фронте волны. Более полную количественную информацию о волновом фронте можно получить интерферометрическим методом. Так, волновой фронт может быть в принципе оценен с интервалом  $\lambda/n$ , где  $\lambda$  – длина световой волны источника, а  $n$  – число проходов лучей через систему.

Суть *метода Тваймана* (1918) состоит в сравнении плоского опорного волнового фронта с фронтом от исследуемой поверхности или системы, форма которого приведена к плоской в случае отсутствия ошибок. Задача состоит в выявлении и измерении деформаций волнового фронта.

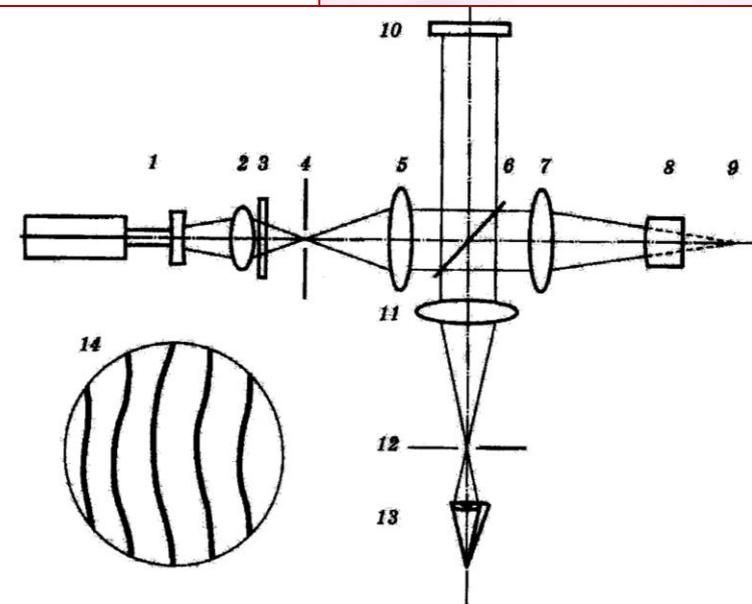


Рис. 11. Интерферометр Тваймана для исследования объектива:  
1 – лазер; 2 и 3 – осветительная система; 3 – светофильтр; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – светоделитель; 7 – исследуемый объектив; 8 – автоколлимационное сферическое зеркало; 9 – центр кривизны автоколлимационного сферического зеркала; 10 – образцовое плоское зеркало; 11 – объектив наблюдательной системы; 12 – наблюдательная диафрагма; 13 – приемник изображения (например – глаз)

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

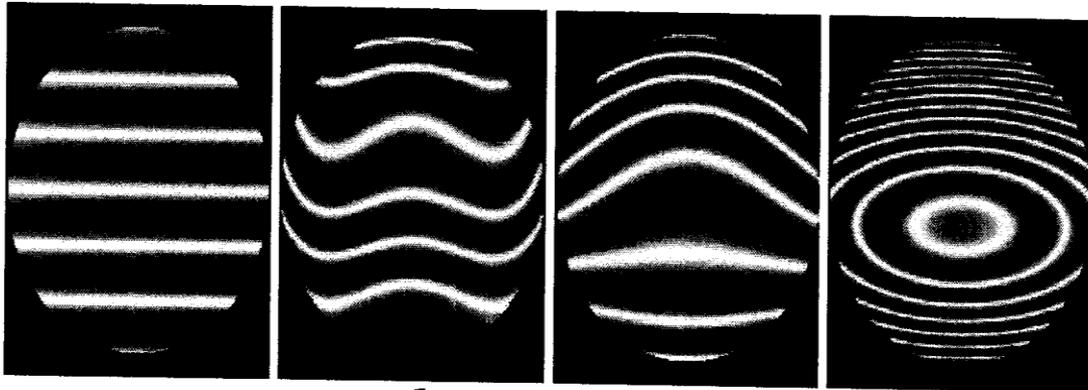


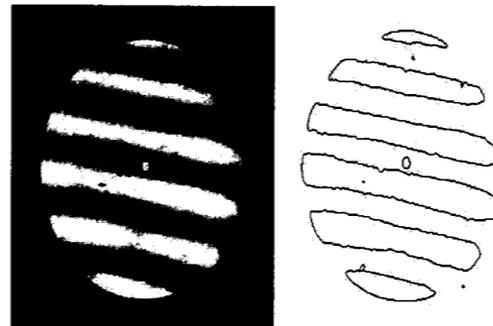
Рис. 12. Формы интерференционной картины для ряда типовых aberrаций: отсутствие aberrаций (а); сферическая aberrация (б); кома (в); астигматизм (г)

Ограничение интерференционного метода в его исходной форме состоит в том, что освещенность поперек полосы изменяется по синусоидальному закону, контуры полос неотчетливы, и поэтому погрешность визуальной расшифровки не менее 0,05 ширины полосы.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

С применением современных методов удастся не только записать информацию, содержащуюся в интерференционной картине при измерениях, но и преобразовать структуру изображения к виду, при котором достигается максимальная возможная точность при его расшифровке (в том числе с использованием компьютерной техники).



Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности расшифровки интерферограммы

В интерференционном методе Тваймана достоинство наглядности, свойственное методу Фуко, сочетается с возможностью количественного измерения искажений волнового фронта, характерной для метода Гартмана

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

При испытаниях и аттестации реализованных интерференционных приборов не выявлено погрешностей, больших  $0,02\lambda$ . При практической работе с дифракционными интерферометрами с обработкой интерференционного изображения с целью повышения точности определения координат полос (например, при помощи телевизионного анализатора интерферограмм ТАИ-1) доказана возможность обнаружения искажений волнового фронта на уровне  $0,005\lambda$  в реальном времени и в интерактивном режиме.

Сферические вогнутые поверхности могут контролироваться таким прибором с точностью более  $0,01\lambda$ .

Существенным недостатком интерференционных методов является нерезкость края интерференционной полосы. Посредством специальных методов обработки удастся повысить точность считывания координат точек в интерферограмме в 8 – 12 раз.

Методы обработки и интерпретации интерферограмм подробно описаны в учебном пособии:

**Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Методы исследования и контроля качества оптических систем . – СПб: НИУ ИТМО, 2012. 125 с.**

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ В ИЗОБРАЖЕНИИ

**Если:**

- оптическая система изопланатична, то есть ФРТ в плоскости изображения одинакова для всех точек объекта;
- система линейна, то есть яркостям в точках объекта соответствуют определенные освещенности в сопряженных точках изображения, так что освещенность в точке является линейной функцией освещенностей, обусловленных разными точками объекта;

- соблюдается условие единичного увеличения, то есть масштаб изображения приведен к масштабу объекта,

**то** распределение освещенности в плоскости изображения есть свертка функций распределения освещенности в объекте и в пятне рассеяния оптической системы:

$$I(x', y') = \iint_{\sigma} O(x, y) \cdot h(x' - x, y' - y) dx dy = O \otimes h$$

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕЩЕННОСТИ  
В ИЗОБРАЖЕНИИ

Если объект рассматривается как сумма элементарных объектов, яркость которых распределена по синусоидальному закону, то его изображение представляет синусоидальную решетку, и изображение сложного объекта получают, суммируя изображения синусоидальных составляющих. Таким образом, передача изображения через оптическую систему описывается с использованием математического аппарата Фурье.

При этом Фурье-преобразование функции изображения равно произведению Фурье-преобразований функции объекта и функции изображения изолированной точки:

$$i(\mu, \nu) = o(\mu, \nu)D(\mu, \nu)$$

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕЩЕННОСТИ В ИЗОБРАЖЕНИИ

Таким образом, если объект и его изображение выражены в виде суперпозиции наложенных синусоидальных решеток различных частот и амплитуд, то амплитуда каждой частотной составляющей изображения

может быть найдена в результате перемножения соответствующей частотной составляющей объекта  $o(\mu, \nu)$

на некоторую функцию  $d(\mu, \nu)$  ,

называемую **оптической передаточной функцией (ОПФ)**.

ОПФ можно получить как Фурье-преобразование ФРТ.

Модуль ОПФ характеризует способность оптической системы передавать контраст объекта при изображении структур разной частоты и называется **модуляционной передаточной функцией (МПФ)**, или **частотно-контрастной характеристикой** системы (ЧКХ). Аргумент ОПФ характеризует правильную передачи оптической системой пространственного расположения малых структурных элементов и называется **частотно-фазовой характеристикой (ЧФХ)**.

Типичная МПФ оптической системы плавно приближается к оси частот. Это означает, что оптическая система неодинаково воспроизводит крупные и мелкие детали объекта: мелкие, соответствующие высоким пространственным частотам, воспроизводятся с меньшим контрастом.

Если ФРТ симметрична, то ЧФХ равна нулю, и для оценки такой системы достаточно использовать только МПФ.

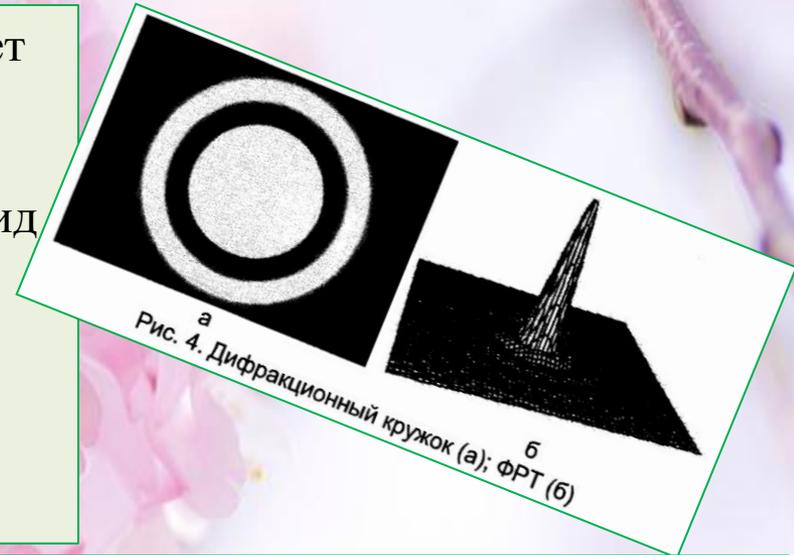
Кирилловский, В.К. Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик.- СПб: ГУ ИТМО, 2005. – 67 с.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Если контролируемая поверхность имеет идеальную форму, то отраженные лучи образуют гомоцентрический пучок, а изображение светящейся точки имеет вид дифракционного кружка: резко очерченный яркий центральный максимум и значительно менее яркое светлое кольцо.



Тест-объектом при количественных измерениях служит освещенная диафрагма малого диаметра или ее уменьшенное изображение. Диаметр светящейся диафрагмы должен быть на порядок меньше диаметра дифракционного кружка, который способна построить исследуемая система:

$$d = \frac{1,22\lambda}{A}$$

где  $A$  – передняя апертура оптической системы,  $\lambda$  – длина световой волны в системе контроля.

Если контролируемый волновой фронт, сформированный системой, искажен ошибками, происходит перераспределение энергии в дифракционных кольцах и искажается их форма.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

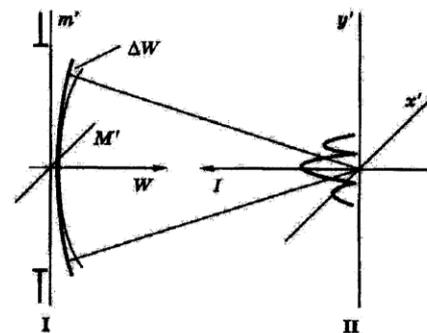
Исследование оптического элемента осуществляется, главным образом, в двух зонах.

1. В зоне изображения II объектом исследования служит, в большинстве случаев, амплитудная характеристика излучения – двумерное распределение освещенности в плоскости изображения, характеризующее концентрацию энергии в изображении и полноту передачи информации о структуре изображаемого объекта.

Здесь формируется **оптическое измерительное изображение первого рода**, подобное объекту и несущее информацию, в первую очередь, о его геометрических параметрах и внешней структуре.

2. В зоне зрачка I объектом исследования служит, чаще всего, фазовая характеристика волнового фронта, а именно – отклонения  $\Delta W$  формы фронта волны от формы, соответствующей требуемому качеству изображения (чаще всего – от сферической формы).

Здесь формируется **оптическое измерительное изображение второго рода**, обычно не подобное объекту, но несущее информацию о характере волнового фронта в части его фазовых деформаций, об абберациях исследуемых оптических систем и элементов и об ошибках формы оптических поверхностей.



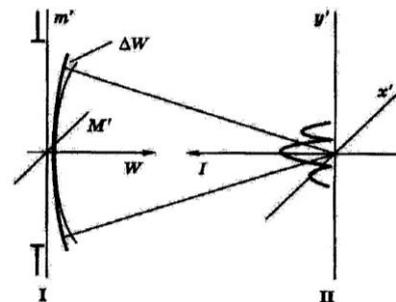
Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований:  $M'$  и  $m'$  – координаты на выходном зрачке оптического элемента в схеме;  $x'$  и  $y'$  – координаты в плоскости изображения тест-объекта;  $W$  – координата формы волнового фронта;  $I$  – относительная освещенность в изображении тест-объекта

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### ПРЯМЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Прямые способы оценки качества изображения состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного посредством оптической системы в зоне II (зоне изображения), и измерении фотометрической структуры этого изображения, то есть в определении функции рассеяния точки (ФРТ) или функции рассеяния линии (ФРЛ). *Функции рассеяния* и связанные с ними *оптическая передаточная функция* (ОПФ), *функция передачи модуляции* (ФПМ) и *функция концентрации энергии* (ФКЭ) в изображении точечного тест-объекта служат на практике *количественными характеристиками качества изображения оптической системы*.



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## ПРЯМЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

При использовании **прямых методов** оценки качества изображения *учитываются все без исключения факторы, участвующие в формировании структуры изображения* (существенное и основное достоинство прямых методов).

Посредством прямых методов удастся определить значения критериев качества изображений: разрешающей способности, порогового контраста, концентрации энергии и др.

**Ограничения прямых методов:** субъективность оценок при визуальных наблюдениях, экспериментальные трудности при измерениях, сложность определения местоположения дефектов системы, обуславливающих ухудшение качества изображения.

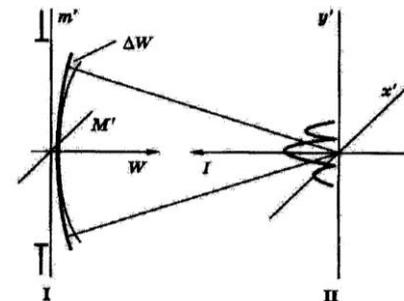
В настоящее время **прямые методы широко применяются** для контроля качества вогнутых сферических поверхностей, оптических элементов микроскопов, высококачественных фотообъективов, объективов зрительных труб и др. Исследуемая поверхность при этом устанавливается так, чтобы образовалось действительное изображение светящейся точки, которое рассматривается в окуляр или микроскоп.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

**Косвенные методы оценки качества изображения** состоят в измерении структуры деформаций волнового фронта в зоне I (зоне зрачка), на выходе измерительной схемы, и последующем вычислении – на основе полученной карты волнового фронта – функций, описывающих структуру и качество изображения.

*Преимущества косвенных методов* состоят в том, что с их применением можно по известной топографии отклонений волнового фронта рассчитать большинство характеристик качества изображения (таких как ФПМ или ФКЭ). Косвенные методы пригодны для определения влияния конкретных искажений волнового фронта, вносимых оптической системой, на качество изображения.



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

### Ограничения косвенных методов:

- высокая трудоемкость расшифровки данных;
- сложный математический аппарат обработки данных;
- дорогостоящее программное обеспечение;
- не учитывается влияние на качество изображения ряда важных факторов, которые могут в корне изменить структуру изображения и резко ухудшить его качество по сравнению с предсказанным (смоделированным) на основе используемого косвенного метода.

К таким факторам относят:

- мелкоструктурные дефекты оптических поверхностей, а также их остаточная шероховатость;
- мелкоструктурные дефекты оптических сред (свили, неоднородности, включения, мутность);
- дефекты оптических покрытий;
- дефекты склеек;
- рассеянный свет в системе;
- блики в оптической системе;
- свет, отраженный от элементов оправы оптической системы и элементов внутренней конструкции оптического прибора.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для оценки качества изображения обычно вводят некоторое число, которое принимают за **критерий качества изображения**. Такое число получают: при анализе выбранной характеристики изображения; или непосредственно из самого изображения выбранного тест-объекта.

**Линейный предел разрешения по Рэлю**

**Частотный критерий**

**Концентрация энергии в пятне рассеяния**

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Определяется как минимальное расстояние между двумя точками объекта, при котором они видны отдельно через оптический прибор при непосредственном наблюдении в высококачественный микроскоп.

Если  $D_1(x, y)$  и  $D_2(x, y)$  – распределения освещенности в двух отдельных изображениях светящихся точек, то при близком расположении точек их изображения частично накладываются друг на друга и формируют некоторое суммарное распределение освещенности. Если  $\varepsilon$  – расстояние между точками, то контраст в изображении пары точек

$$K = \frac{I(y = 0) - I(y = \frac{\varepsilon}{2})}{I(y = 0)} \geq K_n$$

где  $K_n$  – пороговый контраст приемника излучения.

Две точки объекта различаются, если контраст в их изображении больше или равен пороговому контрасту приемника. Если разрешение удовлетворяет критерию Рэля, то центральный максимум первой точки накладывается на первый минимум второй точки. При этом контраст в изображении пары точек составляет 22,5 %.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Частотный критерий

На практике разрешающая способность часто оценивается по предельному числу линий  $R$ , воспроизводимых на 1 мм длины изображения:

$$R = \frac{1,64A'}{\lambda}$$

где  $A'$  - задняя апертура исследуемой системы.

Величина разрешения – та частота, которую можно воспроизвести при данной апертуре идеальной оптической системой, то есть системой, не имеющей aberrаций и формирующей сферический волновой фронт.

Для оценки по частотным критериям пользуются графиком МПФ. Критерием оценки качества по МПФ является точка пересечения графика ФПМ и кривой контрастной чувствительности приемника изображения (определяется контраст, с которым передается изображение).

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Частотный критерий

Для малоформатных фотообъективов «сюжетно важным» принимают интервал  $\mu = 0 \dots 40$  мм. Критерий вычисляется по формуле

$$J = \frac{1}{\mu_{np}} \int_0^{\mu_{np}} T(\mu) d\mu$$

где  $\mu_{np}$  – частота, принятая в качестве предельной на «сюжетно важном» участке,  $T(\mu)$  – модуль МПФ, иначе называемой ЧКХ.

Значение МПФ на фиксированной частоте – **коэффициент передачи контраста (КПК)**. При оценке качества изображения по МПФ определяют значение контраста на некоторой критической частоте  $\mu_{кр}$ . Наиболее распространенным является применение  $\mu_{кр}$ , которое определяется при  $T = 0,8$ .

При оценке оптических систем для телевидения используется соотношение

$$\mu_{кр} = n/2h_r,$$

где  $n = 635$  – число строк разложения,  $h_r$  – размер чувствительной площадки передающей телевизионной трубки (обычно  $h_r = 24$  мм, тогда  $\mu_{кр} = 13$  мм<sup>-1</sup>).

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Концентрация энергии в пятне рассеяния

Концентрацию энергии определяют, исходя из ФРТ системы, и выражают в виде процентного отношения количества энергии, сконцентрированной в кружке данного диаметра, ко всей энергии, распределенной в пятне рассеяния:

$$L_k = \frac{F_d}{F}$$

$$F_d = \int_0^{r=d/2} D(r)rdr$$

где  $D(r)$  – ФРТ.

С другой стороны, вся энергия в пятне

$$F = \int_0^{\infty} D(r)rdr$$

Величины  $F(d)$  и  $F$  могут быть измерены непосредственно фотометром. Кроме того, их можно определить в результате математической обработки ФТР.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Таким образом, при оценке качества оптических систем требуются оценки **следующих основных характеристик:**

- *качества изображения;*
- *аббераций системы;*
- *формы оптических поверхностей.*

Указанные характеристики связаны между собой однозначными математическими зависимостями, учитывая которые при известных волновых абберациях можно рассчитать распределение освещенности в изображении светящейся точки, то есть ФРТ. Однако при этом следует помнить, что для таких вычислений требуется мощный компьютер и дорогостоящее программное обеспечение. Не менее затратна расшифровка результатов измерения формы волнового фронта (например, по интерферограмме) и ввод этих данных в персональный компьютер.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

**Кирилловский, В.К. Оптические измерения. Ч. 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. –СПб ГУ ИТМО, 2005. - 67 с.**

В этом пособии рассмотрены методы измерения ЧКХ объективов и экспериментального исследования структуры пятна рассеяния. Акцент сделан на методах фотографической и фотоэлектрической фотометрии, а также методе изофотометрии. При этом описаны суть методик и алгоритмы измерений и обработки полученной информации (включая компьютерную обработку).

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### Измерение радиусов кривизны

Область, охватывающая методы измерения радиусов кривизны сферических поверхностей, называется **сферометрией**.

Измерение радиуса кривизны обязательно как в процессе изготовления, так и при окончательной обработке оптических деталей.

Различают механические (контактные) и оптические (бесконтактные) методы измерения радиусов кривизны. Выбор метода зависит от величины измеряемого радиуса кривизны, точности и удобства измерения.

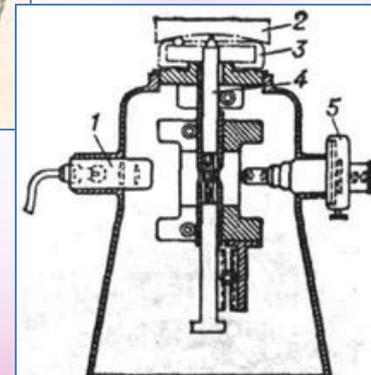
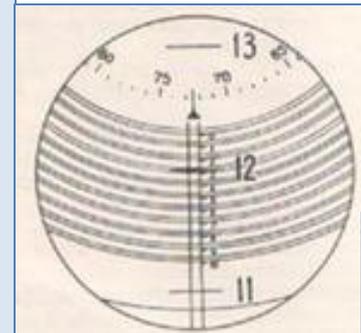
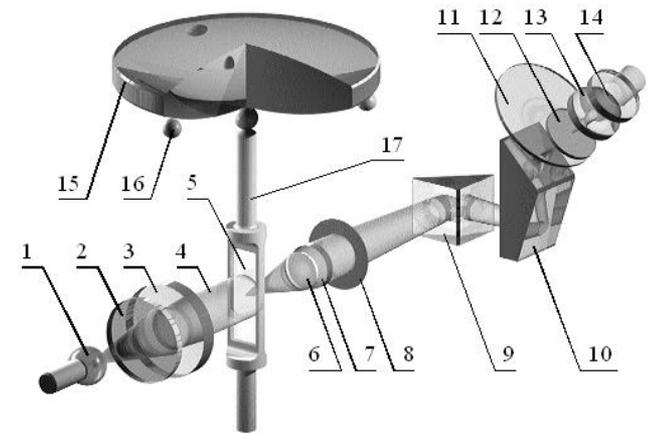
### Выбор метода измерения в соответствии с ГОСТ 11194-76

<i>Радиус кривизны поверхности</i>	<i>Применяемый метод (прибор)</i>
До 37,5 мм	Винтовой микрометр
От 37,5 до 750 мм	Кольцевой сферометр ИЗС-7
От 80 до 40000 мм	Сферометр ИЗС-8
От 750 до 5000 мм	Метод автоколлимации из центра кривизны
Свыше 5000 мм	Метод колец Ньютона

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

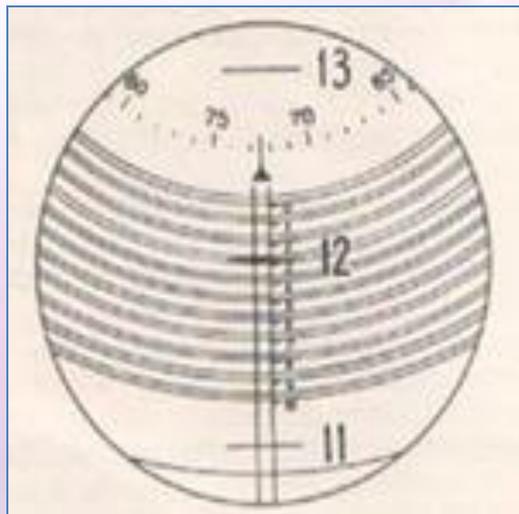
Внутри массивного корпуса по точным направляющим 3 перемещается измерительный стержень 1, на котором жестко закреплена миллиметровая шкала 2.

Противовес (гидравлический) 4 служит для обеспечения плавного соприкосновения шарика измерительного стержня с поверхностью измеряемой детали 5. Шкала 2 освещается осветителем 6. Объективом 7 отсчетного микроскопа увеличение  $5^{\times}$ ) изображение шкалы 2 с помощью прямоугольной призмы 8 и полупентапризмы 9 проецируется в переднюю фокальную плоскость окуляра 12 (увеличение  $12,5^{\times}$ ). Для удобства работы оптическая ось окулярной части отсчетного микроскопа наклонена под углом  $45^{\circ}$ . Отсчетным устройством микроскопа является спиральный окулярный микрометр ОМС. На неподвижной окулярной сетке 10 нанесена линейная шкала (10 делений) и индекс. На сетке 11, поворачиваемой от маховичка 13, нанесены одиннадцать витков двойной спирали Архимеда и круговая шкала, разделенная на 100 частей.



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



В поле зрения виден результат наложения изображений трех шкал: миллиметровой шкалы, шкалы десятых долей миллиметра и шкалы сотых и тысячных долей миллиметра. Для проведения отсчета необходимо поворотом маховичка установить шкалу 2 так, чтобы штрих миллиметровой шкалы, находящейся в зоне витков, оказался точно посередине между линиями ближайшего к нему витка спирали. Индексом для отсчета миллиметров служит нулевой штрих неподвижной шкалы. На рисунке штрих "12" прошел нулевой штрих шкалы десятых долей, а штрих "13" еще не дошел до него. Отсчет равен 12 мм плюс отрезок от штриха "12" до нулевого штриха. В данном случае число десятых в этом отрезке равно двум. Сотые и тысячные доли миллиметра отсчитываются по круговой шкале. Окончательный отсчет равен 12,2725 мм.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### Измерение радиусов кривизны

Радиус кривизны сферической поверхности R, мм	Погрешность показаний в зависимости от радиуса опорного кольца, %			
	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>4</sub>
80	0,04	-	-	-
750	0,07	0,04	0,06	0,04
1000	0,10	0,05	0,07	0,05
5000	0,50	0,25	0,20	0,15
40000	0,50	1,70	0,80	0,50

Радиусы измерительных (опорных) колец и шариков		
Номер кольца	Радиус, мм	
	кольца	шарика
1	r <sub>1</sub> = 45,0191	ρ <sub>1</sub> = 3,1060
2	r <sub>2</sub> = 74,9500	ρ <sub>2</sub> = 3,1100
3	r <sub>3</sub> = 109,967	ρ <sub>3</sub> = 3,1110
4	r <sub>4</sub> = 119,824	ρ <sub>4</sub> = 3,1120

При работе с ИЗС-8 расчет радиусов кривизны сферических поверхностей ( $R$ ) производится с учетом радиуса измерительного кольца ( $r$ ) и радиуса шариков  $\rho$  по формуле

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h} \pm \rho,$$

где  $h$  - высота шарового сегмента (стрелка прогиба), мм.

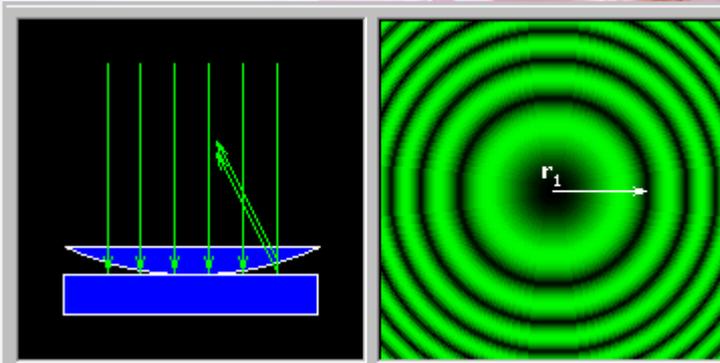
Для вогнутой поверхности величину  $\rho$  берут со знаком "плюс", а для выпуклой - "минус".

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### Измерение радиусов кривизны

Методом колец Ньютона можно измерить стрелку прогиба сферической поверхности с точностью до 0,03 мкм. Он имеет преимущество перед сферометром, если радиус кривизны поверхности очень велик.



Радиус сферической поверхности

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h}$$

где  $r$  - радиус сегмента сферы, соответствующий стрелке прогиба  $h$ , равен радиусу интерференционного кольца, соответствующему разности хода  $2h$  между интерферирующими лучами.

На практике измерения диаметров колец начинают с 4 - 6-го кольца, а для вычисления  $R$  используют эквивалентную формулу

$$R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4\lambda(m - n)}$$

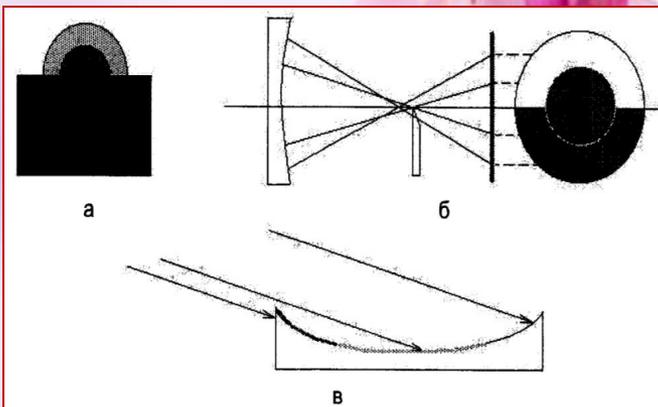
где  $D_m$  и  $D_n$  - диаметры колец соответственно с номерами  $m$  и  $n$ .

Из формулы следует, что собственные номера колец  $m$  и  $n$  могут оставаться неизвестными. Для вычисления радиуса  $R$  необходимо знать разность  $m - n$ .

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Теневой метод Фуко  
для определения радиусов кривизны линз

Светящаяся точка находится перед поверхностью вблизи её центра кривизны. Находят положение  $S'$  автоколлимационного изображения точки. Глаз располагают так, чтобы весь отраженный от поверхности пучок попадал в его зрачок, и поверхность была видна вся равномерно освещенной. В пучок лучей вводят нож и наблюдают соответствующие теневые картины на поверхности. Когда нож перекрывает изображение точки, вся поверхность (чувствительное положение ножа) будет темнеть равномерно. Измерение состоит в том, что устанавливают нож в чувствительное положение и измеряют расстояние между плоскостью ножа и поверхностью детали  $L$ , принимая его за  $R$ .

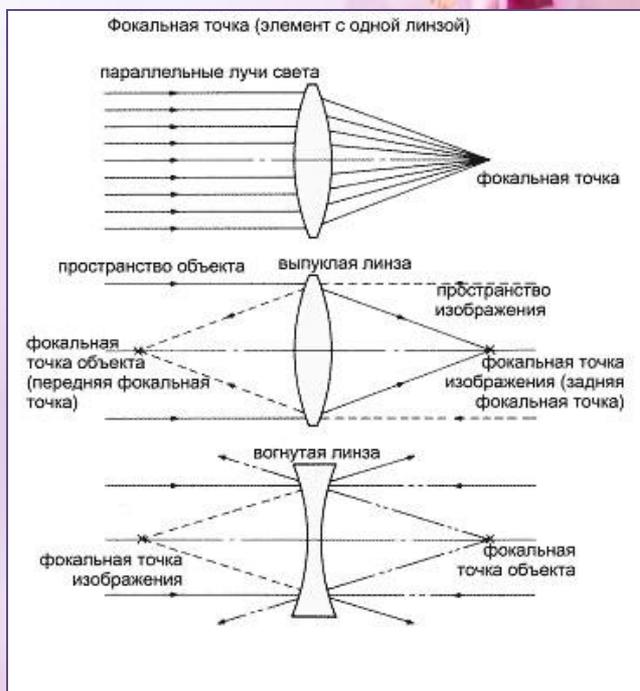


**Чувствительность установки ножа  $1/60 \lambda$ .**  
При этом возникает систематическая ошибка от того, что центр кривизны поверхности  $O$  лежит не в плоскости ножа, а на окружности радиуса  $R$ , проходящей через  $S$  и  $S'$  (ошибка равна  $h$ ), и ошибки от перекосов прямой  $SS'$ . Можно внести поправку  $h = a^2/8 L$ , и принять:  
$$R = L + h,$$
где  $a$  – расстояние между  $S$  и  $S'$ .

Расстояние  $L$  измеряется нутромером, а при очень больших значениях  $L$  – точной рулеткой. Погрешность - (0,02 0,05)%.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



Передние  $f$  и задние  $f'$  фокусные расстояния являются основными характеристиками объективов и линз. Как правило, измеряют заднее фокусное расстояние  $f'$ . Измерение осуществляется на *оптической скамье*. Положение главного фокуса находится как место, где располагается изображение бесконечно удаленного точечного предмета. В качестве такового используется центр перекрестья сетки коллиматора точно установленного на бесконечность. Такой способ определения положения  $F'$  неточен, так как вследствие дифракции изображение вдоль оси имеет конечные размеры, иногда довольно большие. Аберрации могут привести к еще большему увеличению длины изображения.

Фокусное расстояние, чаще всего измеряется *косвенными методами*, и точность измерения обычно невысока. *Предельно достижимая точность измерения для многих систем 0.1%.*

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Измерение характеристик оптических систем

Допустимые погрешности  
при определении  
фокусных расстояний

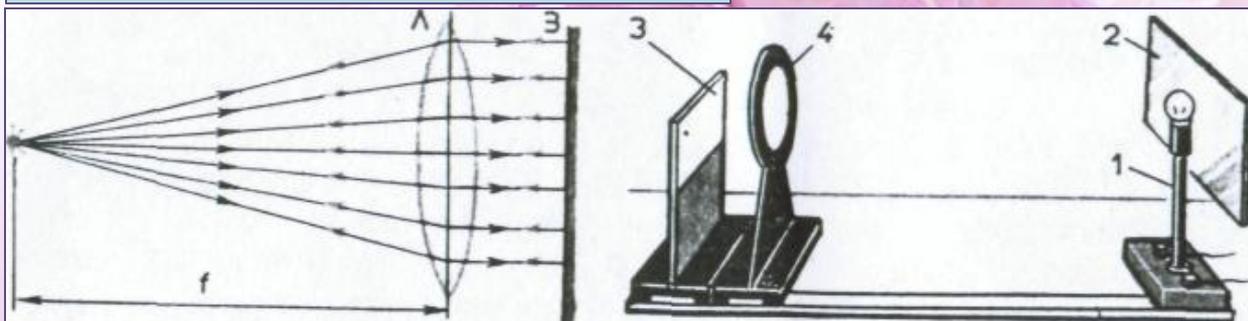
Оптические детали	Допустимая погрешность, %	Дополнительные условия
Очковые линзы	1,0	Достигается без особых предосторожностей
Оптические элементы биноклярных приборов	0,1	Достигается, если остаточные aberrации систем менее 0,1 % от фокусного расстояния, и при соблюдении других условий
Линзы объективов для дальномеров, коллиматоров измерительной машины, фотограмметрических камер и других ответственных деталей	0,05	Достигается, если aberrации меньше 0,01% и при применении особой методики измерения. Испытуемая система при измерении обязательно должна находиться в положении наименьших aberrаций.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

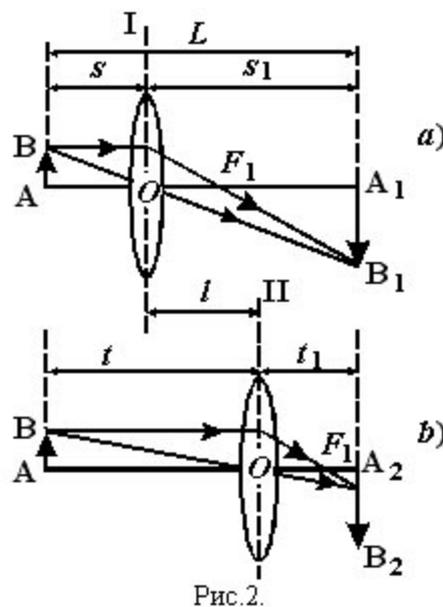
## Тема 6 Основы измерений

Методы измерения фокусного расстояния

Автоколлимационный метод



Метод Бесселя



$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}$$

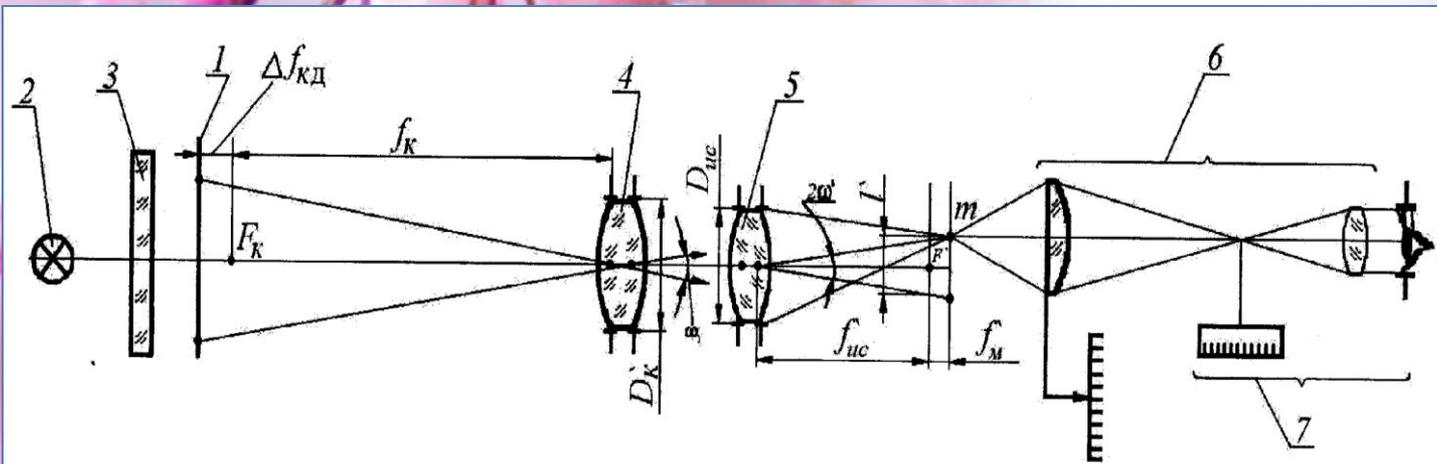
$$L > 4f$$

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

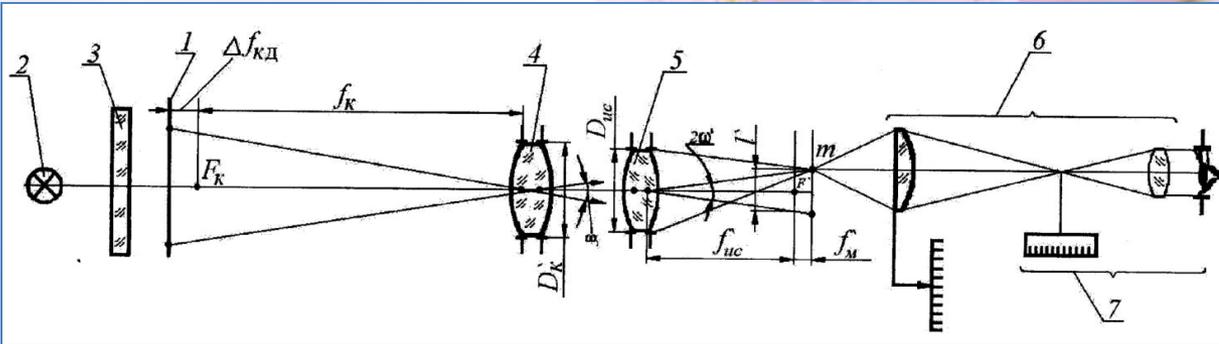
## Метод фотоколлиматора

Это наиболее распространенный способ измерения фокусного расстояния в производственных условиях. Измеряется линейный размер изображения предмета, угловая величина которого должна быть известна.

Прибор состоит из неподвижного коллиматора с первоклассным объективом, диаметр которого больше диаметра испытуемой системы, окулярного микрометра, который может перемещаться вдоль оси. В фокальной плоскости объектива коллиматора помещена сетка, угловой размер которой  $\omega$  точно известен. Испытуемая система центрируется относительно оптической оси прибора. Окулярный микрометр фокусируется на резкое изображение сетки коллиматора, и с помощью микрометрического винта определяется размер изображения  $2y'$ . Система построена по принципу равных углов, т.е.  $\omega = \omega'$ ,



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ



Поэтому  $F_{И}' = y' / \operatorname{tg} \omega$ .

Формула погрешности  $\Delta f' / f' = \Delta y' / y' + \sec^2 \omega \cdot \Delta \omega / \operatorname{tg} \omega$ .

Так как  $\omega \leq (5 \div 6)^\circ$ , то можно взять приближенно  $\Delta f' / f' = \Delta y' / y' + \Delta \omega / \omega$ .

$\Delta y'$  определяется чувствительностью поперечных и продольных наводок, так как в системе не телецентрический ход лучей, и размер изображения зависит от точности фокусировки. Предельная точность фокусировки скорректированной системы равна  $\Delta z'$ , зависит от  $u_{ис}'$ . Неточность фокусировки обуславливает ошибку в измерении фокусного расстояния  $\Delta f' / f' = \Delta z' / u_{ис}'$ .

Таким образом,  $\Delta f' / f' = \Delta y_{\text{поп}}' / y' + \Delta z' / u_{ис}' + \omega / \omega$ .

При определении точности прибора в  $\Delta y_{\text{поп}}$  войдет еще погрешность окулярного микрометра. Для получения точности 0,3% надо иметь окулярный микрометр с погрешностью отсчета 5 мкм,  $\omega$  должно быть известно с погрешностью до 10", а  $\Delta z'$  не должно превышать 0,1 мм.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

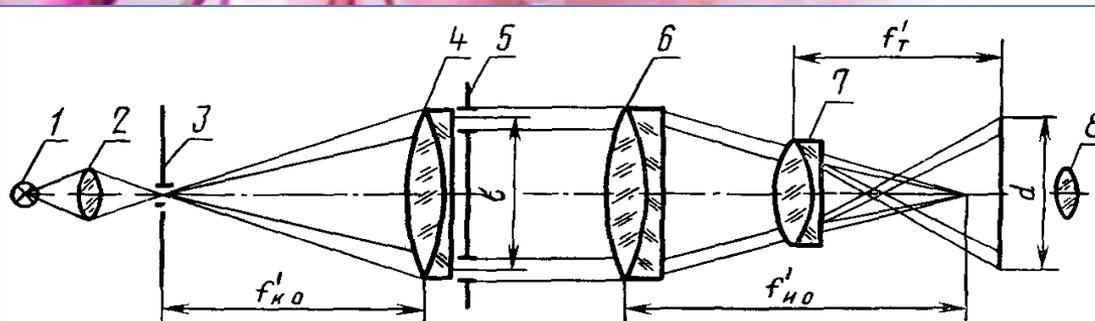
## Фотометр Фабри - Юдина

Метод основан на внефокальных наблюдениях при использовании очень узких пучков лучей, которые имитируют отдельные геометрические лучи.

Если на расстоянии  $v$  от фокуса испытуемой системы поставить матовый экран, то на нем будут видны следы двух лучей, прошедших через отверстия диафрагмы, в виде светлых кружков, расстояние между которыми  $a_2$  можно измерить. Тогда

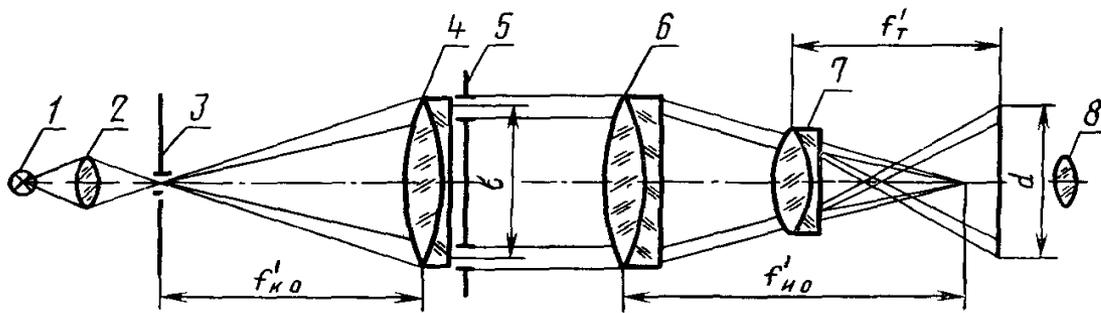
$$f_{ис}' = a_1 v / a_2.$$

Однако измерение  $v$  сложно, поэтому используют схему, приведенную на рисунке.



1—источник света, 2—конденсор, 3—щель коллиматора, 4—объектив коллиматора; 5—диафрагма с набором пар щелей; 6—испытуемый объектив, 7—объектив зрительной трубы, 8—окуляр микрометр

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

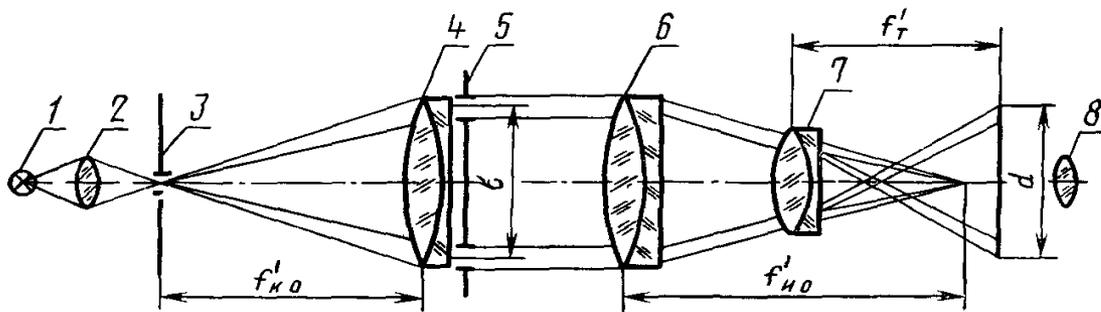


1—источник света, 2—конденсор, 3—щель коллиматора, 4—объектив коллиматора; 5—диафрагма с набором пар щелей; 6—испытуемый объектив, 7—объектив зрительной трубы, 8—окуляр микрометра

В фокальной плоскости объектива коллиматора помещена освещенная щель  $\text{щ}_1$ , а перед коллиматором находятся две симметричные оси щели  $\text{щ}_2$ , параллельные щели  $\text{щ}_1$ . Соосно с коллиматором расположена зрительная труба с окулярным микрометром, точно установленная, на бесконечность. Испытуемая система располагается между двумя трубами и центрируется относительно их оси. Вследствие дифракции от двух щелей, в плоскости сетки микрометра будут видны две системы полос расстояние, между которыми  $a_2$  и измеряется.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений



1—источник света, 2—конденсор, 3—щель коллиматора, 4—объектив коллиматора; 5—диафрагма с набором пар щелей; 6—испытуемый объектив, 7—объектив зрительной трубы, 8—окуляр микрометра

При этом фокусное расстояние

$$f'_{ис} = a_1 f'_T / a_2,$$

где  $a_1 f'_T$  - постоянная прибора.

Точность метода определяется чувствительностью поперечных наводок и зависит от резкости и ширины нулевой центральной светлой полосы  $\Delta f' / f' = \Delta a_2 / a_2$ .

Метод пригоден для контроля отрицательных и положительных систем в большом диапазоне фокусных расстояний (от 70 до 5000 мм). Длина установки не зависит от измеряемого фокусного расстояния.

Погрешность измерения 0,3-1%. Для получения максимальной точности надо брать  $a$  как можно больше и подбирать оптимальную ширину деталей.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

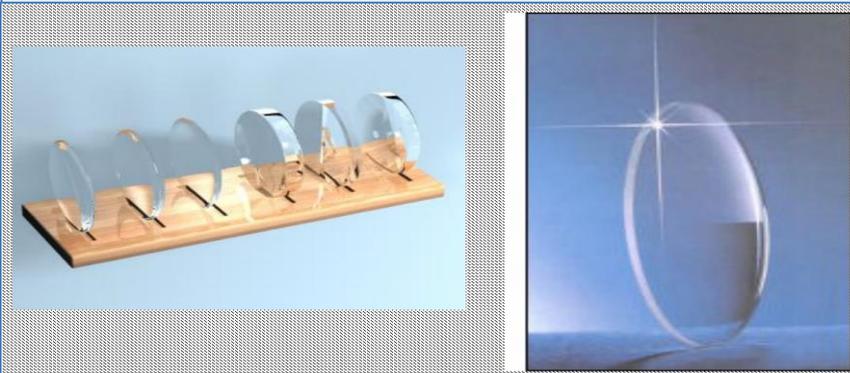
## Тема 6 Основы измерений

### Контроль децентрировки линз

Децентрировкой линзы со *сферическими* поверхностями называют несовпадение оптической оси линзы с геометрической осью ее посадочной цилиндрической поверхности.

У *асферической* линзы каждая из поверхностей имеет собственную оптическую ось. При децентрировке эти оси не совпадают. Поэтому для асферической линзы нужно рассматривать децентрировку каждой поверхности относительно геометрической оси.

Децентрированная линза обладает *разнотолицинностью*  $\Delta d$  по краю и *клиновидностью*, поэтому может быть представлена как совокупность центрированной линзы и клина с углом  $\theta = \Delta d / D$ , где  $D$  – диаметр линзы.



# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

В соответствии с ГОСТ 2.412–81 децентрировку линзы со сферическими поверхностями задают *позиционным допуском* или *допуском на форму поверхности*.

*Позиционный допуск* – это допустимое смещение центра кривизны сферической поверхности линзы с оси, определяемой базовыми поверхностями.

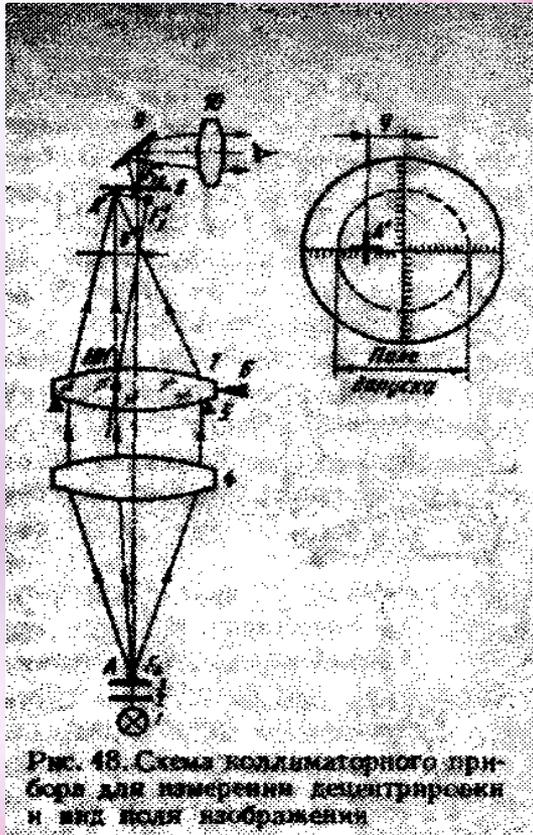
*Допуск формы заданной поверхности* – наименьшее допускаемое отклонение точек реальной поверхности от номинальной относительно заданных базовых поверхностей. Фактически это допустимая разнотолщинность по краю. Если линза содержит плоскую поверхность, то расположение этой поверхности определяется допуском перпендикулярности, то есть наибольшим допустимым отклонением угла между плоскостью и базовой осью от  $90^\circ$ .

Допуск на децентрировку *асферической поверхности* задают в виде допустимого смещения вершины этой поверхности от оси, определяемой базовыми поверхностями; при этом на чертеже обязательно указывать уравнение этой поверхности.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Тема 6 Основы измерений

### Контроль децентрировки линз



**Коллимационный способ** реализуют на приборе, состоящем из лампы 1 с матовым стеклом 2, объектива 4 коллиматора, в фокальной плоскости которого расположена сетка 3, окуляра 10 с сеткой 8 и базирующего устройства 5, 6 для измеряемых линз. Зеркало 9 предназначено для излома оптической оси. Для увеличения чувствительности окуляр заменяют микроскопом. Прибор используют для измерения децентрировки линз диаметром 70 ... 150 мм, а также при центрировке линз в процессе склейки или сборки в оправы.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

## Контроль децентрировки линз

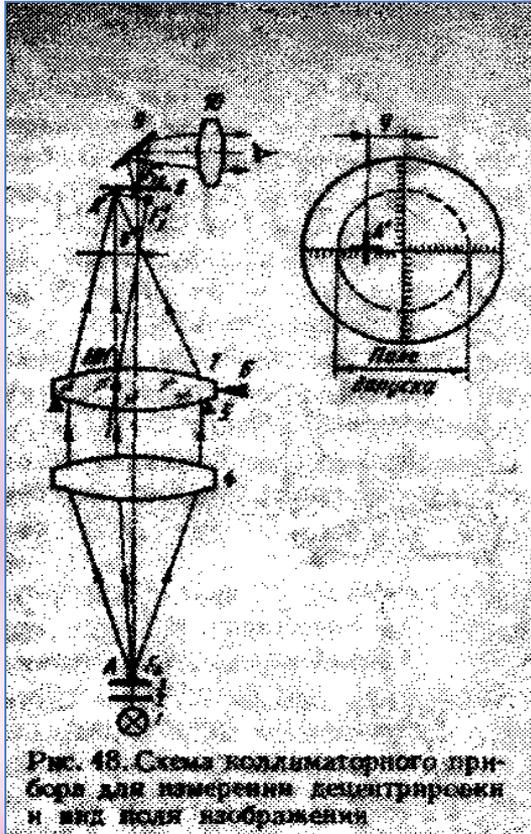


Рис. 48. Схема коллиматорного прибора для измерения децентрировки и вид после изображения

Исследуемая положительная линза совместно с объективом коллиматора формирует в задней фокальной плоскости изображение точки  $A'$  точки  $A$ , совпадающей с центром перекрестия сетки  $З$ . Окуляр наводят на резкое видение  $A'$ . Если измеряемая линза центрирована, то при её вращении точка  $A'$  неподвижна. Если линза децентрирована, то при её вращении точка  $A'$  в фокальной плоскости описывает окружность. Прибор настраивают так, чтобы его оптическая ось совпала с осью вращения линзы; тогда центр окружности, по которой движется точка  $A'$ , совместится с центром сетки  $8$ . Значение  $y$ , измеренное по сетке, равно смещению главных точек  $НН'$  линзы от оси вращения.

Значение  $y$  связано с разнотолщинностью зависимостью 
$$\Delta d \approx yD/[f'(n - 1)]$$

где  $f'$  – фокусное расстояние,  $n$  – показатель преломления,  $D$  – диаметр исследуемой линзы.

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Контроль децентрировки линз

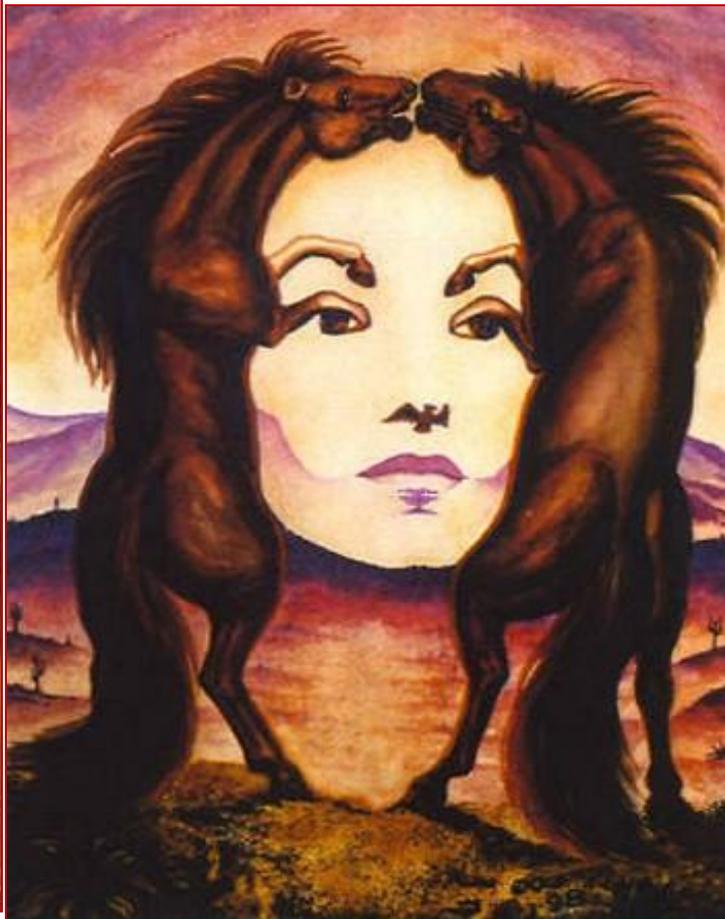
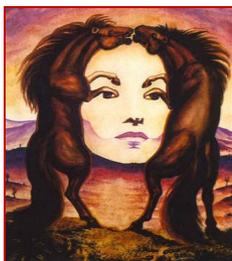
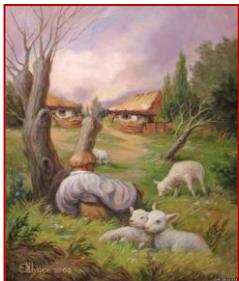
Принцип действия других приборов для измерения децентрировки линз (включая интерференционные и фотоэлектрические) описан в книге:

Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения / Под общ. ред. Д.Т. Пуряева. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.

# *Чудеса картинной галереи*



# Чудеса картинной галереи



# Чудеса картинной галереи



# *Чудеса картинной галереи*

