

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра общей и экспериментальной физики

Сборка и юстировка теневой установки по методу
щели и нити, получение и обмер теневой картины
модельного объекта (длиннофокусной линзы) по методу
щели и нити, определение её фокусного расстояния
Методические указания к лабораторной работе № 6

БАРНАУЛ–2010

Составитель В. В. Чертищев (к.ф.-м.н., доцент) УДК 536

Сборка и юстировка теневой установки по методу щели и нити, получение и обмер теневой картины модельного объекта (длиннофокусной линзы) по методу щели и нити, определение её фокусного расстояния: метод. указания к выполнению лабораторной работы по специальному физическому практикуму специализации «теплофизика» к спецкурсу «Оптические методы теплофизики» /Алт.гос.ун-т: составитель В.В. Чертищев. Барнаул, 2010, 15 с.

Дано краткое описание разновидности теневого метода Теплера – метода щели и нити, излагается порядок выполнения работы. Даются контрольные вопросы, приводится список литературы. Описана методика юстировки теневого прибора и методика измерений по методу щели и нити.

Предназначено для студентов специальности 010701.65 «физика» специализации «теплофизика». Ил. 7. Библиогр. 3.

Сборка и юстировка теневой установки по методу щели и нити

Цель работы: ознакомление с количественными теплеровскими методами исследования стационарных неоднородностей, приобретение навыков юстировки прибора, подготовка эталонной неоднородности для выполнения работы «Исследование температурного поля эталонным фотометрическим методом».

Оборудование: осветитель, коллиматор с щелью, держатели в рейтерах, поворотный и микрометрический столики (из комплекта оптической скамьи ОСК-2), конденсор, объектив ОТ-500, обойма для крепления шайбы с нитью, шайба с нитью, линза с удлинительными кольцами (используется в качестве фотографического объектива), фотоаппарат, горизонтальный микроскоп, длиннофокусная линза (в качестве исследуемой стеклянной пластины переменной толщины).

Введение

Методы щели и ножа, щели и нити позволяют исследовать стационарные объекты, такие как изделия из оптического стекла (плоскопараллельные пластины, призмы, линзы, подложки зеркал) и т.п., с целью выявления дефектов (шлир), или визуализировать (сделать видимой) картину течения неоднородных (например, по составу или температуре) жидкости или газа.

В настоящей работе выполняется юстировка теневого прибора для последующего его использования по методу щели и нити.

1. Общая теория теневых методов

Принцип теневого метода был предложен в 1858 г. французским астрономом Леоном Фуко для контроля качества изготовления больших астрономических объективов высокой разрешающей силы: на некотором расстоянии от испытываемого объектива помещается точечный источник света S (рис. 1). Объектив O создает изображение S' этой точки. В плоскости изображения источника (перпендикулярной оптической оси) размещается непрозрачная пластинка с острым прямолинейным краем – так называемый нож Фуко Φ . Если у объектива нет дефектов, то при перемещении ножа Фуко перпендикулярно оптической оси объектива в плоскости изображения источника картина за ножом Фуко мгновенно и равномерно гаснет, как только тот закрывает изображение источника света. Ес-

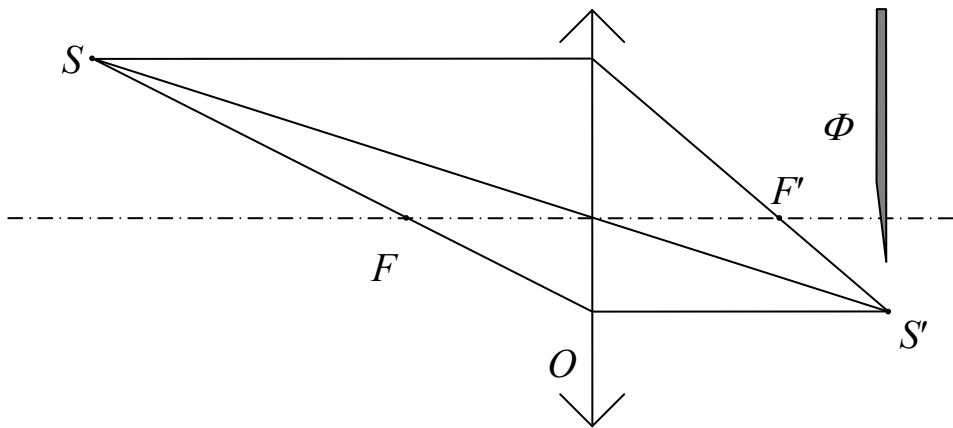


Рис. 1. Оптическая схема теневого метода Леона Фуко.
 S - точечный источник света, S' - его изображение, O - объектив, F и F' - его передний и задний фокусы., Φ - нож Фуко.

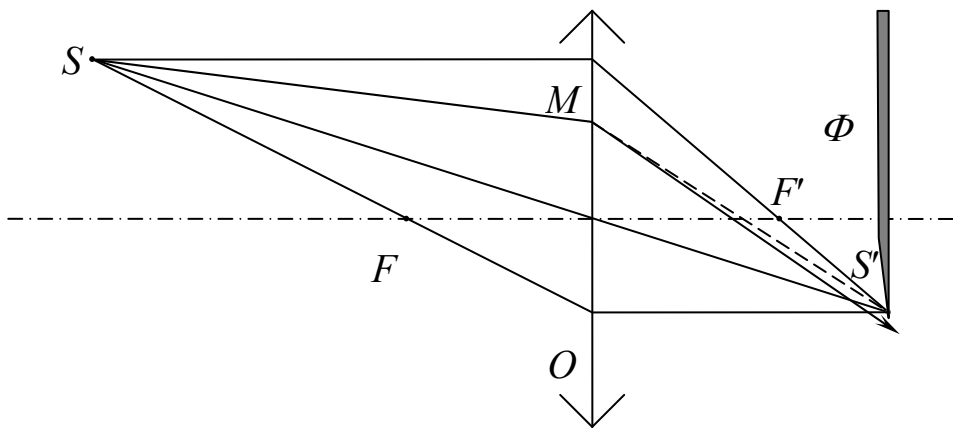


Рис. 2. Прохождение света через дефектную область объектива.
 Пунктиром изображён луч в отсутствие дефектной области.

ли же у объектива есть дефектная область, то она отклонит световые лучи не так, как должна была отклонить, и лучи пройдут мимо основного изображения источника и создадут дополнительное изображение в другом месте (допустим для определенности, что на рис. 2 луч, проходящий через точку M дефектной области, отклоняется в направлении ниже основного изображения). Поэтому в тот момент, когда нож Фуко перекроет основное изображение, часть лучей, прошедших через дефектную область объектива, не будет перекрыта ножом. Если при этом смотреть на объектив со стороны ножа, лучи света, прошедшие через дефектную область, будут попадать в глаз наблюдателя, и дефектная область будет казаться освещенной на темном фоне.

Когда при фиксированном положении ножа Фуко перекрыто основное изображение точечного источника света, лучи, отклоненные дефектными областями объектива в сторону ножа Фуко на лю-

бой угол, тоже будут перекрыты ножом. Если лучи отклоняются дефектными областями объектива в противоположную сторону на малый угол, не превышающий некоторую величину, определяемую положением ножа Фуко относительно основного изображения источника света, они тоже будут перекрыты ножом (рис. 3). Поэтому

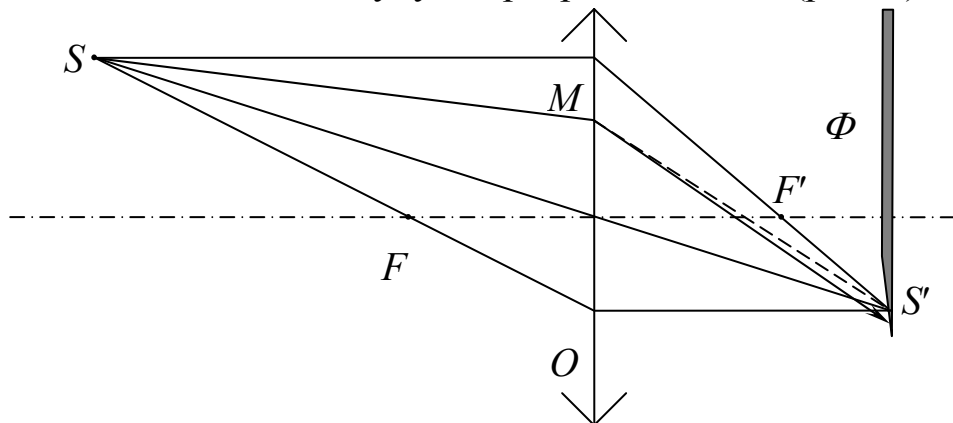


Рис. 3. Прохождение света через дефектную область объектива, отклоняющую свет в сторону ножа Фуко. Все лучи перекрыты ножом.

светлыми на темном фоне будут выглядеть лишь те дефектные области, которые отклонили лучи в соответствующую сторону на больший угол.

При повороте ножа Фуко вокруг оптической оси объектива на 180° и смещении в такое положение, что его кромка окажется на том же месте, что и ранее, основное изображение источника, создаваемое качественно изготовленными участками объектива, откроется, тогда как отклоненные дефектной областью лучи, напротив, закроются ножом Фуко. Дефектная область будет видна теперь темной на светлом фоне.

Отклонение лучей от правильного хода может вызываться не только дефектами объектива, но и любыми оптически неоднородными объектами (сокращенно—неоднородностями), именуемыми также шлирами, помещенными между источником света и объективом или между объективом и ножом Фуко. В 1864 г. немецкий физик Август Теплер применил метод Фуко для исследования газовых неоднородностей. По существу он открыл лишь новое применение уже известного метода Леона Фуко, но большая ценность полученных результатов и все возрастающая роль газовой динамики в общем развитии науки привели к тому, что во многих последующих работах этот теневой метод назывался именем Теплера, а имя Леона

Фуко закрепилось за одной из возможных визуализирующих диафрагм – ножом Фуко.

Теневая установка по методу Теплера может иметь один основной (приёмный) объектив, как на рис. 1–3, но удобнее для интерпретации результатов измерений установка, в которой исследуемый объект размещается в пучках параллельных лучей. Пучок параллельных лучей теоретически можно получить от точечного источника S , удаленного на бесконечность, а практически, с хорошим приближением, поместив близкий к точечному источник в переднюю фокальную плоскость объектива, называемого коллиматорным (коллиматор коллимирует световые лучи – из расходящихся делает их параллельными). Положение источника S в фокальной

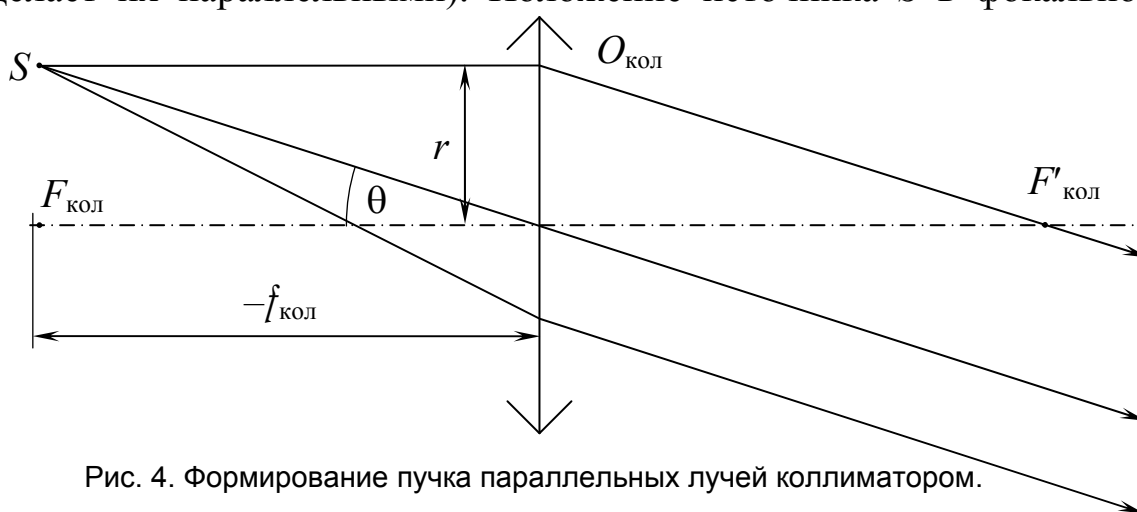


Рис. 4. Формирование пучка параллельных лучей коллиматором.

плоскости относительно переднего фокуса $F_{\text{кол}}$ определяет наклон пучка параллельных лучей относительно оптической оси коллиматора (рис. 4): $\text{tg } \theta = r/f'_{\text{кол}}$ (фокусные расстояния отсчитываются от линзы и считаются положительными, если откладываются по ходу световых лучей, и отрицательными, если против хода света).

Если у приемного (основного) и коллиматорного объективов теневой установки общая оптическая ось (что часто и делается), то пучок параллельных лучей, вышедших из коллиматора под углом θ к оптической оси, соберется в задней фокальной плоскости приемного объектива в точке S' (рис. 5) на расстоянии $r = f'_{\text{пр}} \text{tg } \theta$ или, если угол θ мал, $r = f'_{\text{пр}} \theta$.

Направим ось Z декартовой системы координат вдоль оптической оси, а оси X и Y ориентируем пока произвольно. Проекции некоторого луча, входящего в приемный объектив, на плоскости XZ и YZ составят с осью Z некоторые углы, которые обозначим соответственно θ_x и θ_y . Если теперь поместить в рабочее пространство

между коллиматорным и приемным объективами шлиры (исследуемый объект), она будет отклонять световые лучи, причем разные участки шлиры будут отклонять лучи на разные углы. Пусть один из лучей вошел в шлиру в точке A (рис. 6), прошел сквозь нее и пересек прилегающую к ней плоскость, перпендикулярную оптической оси и отображаемую проекционным объективом (совместно с приемным) на экран (или светочувствительный слой), в точке с координатами $x, y, z_{ш}$. Этот луч отклонился от первоначального направления, задаваемого углами θ_x и θ_y , на угол ε . Проекции этого луча на плоскости XZ и YZ теперь составляют с осью Z углы $\theta_x + \varepsilon_x(x, y)$ и $\theta_y + \varepsilon_y(x, y)$. Если прошедшие мимо шлиры лучи собираются в задней фокальной плоскости приемного объектива в точке с координатами

$$x'_S = f'_{пр} \theta_x; \quad y'_S = f'_{пр} \theta_y,$$

то отклоненный шлирой луч пересечет заднюю фокальную плоскость в точке с координатами

$$x''_S = f'_{пр} (\theta_x + \varepsilon_x(x, y)); \quad y''_S = f'_{пр} (\theta_y + \varepsilon_y(x, y)).$$

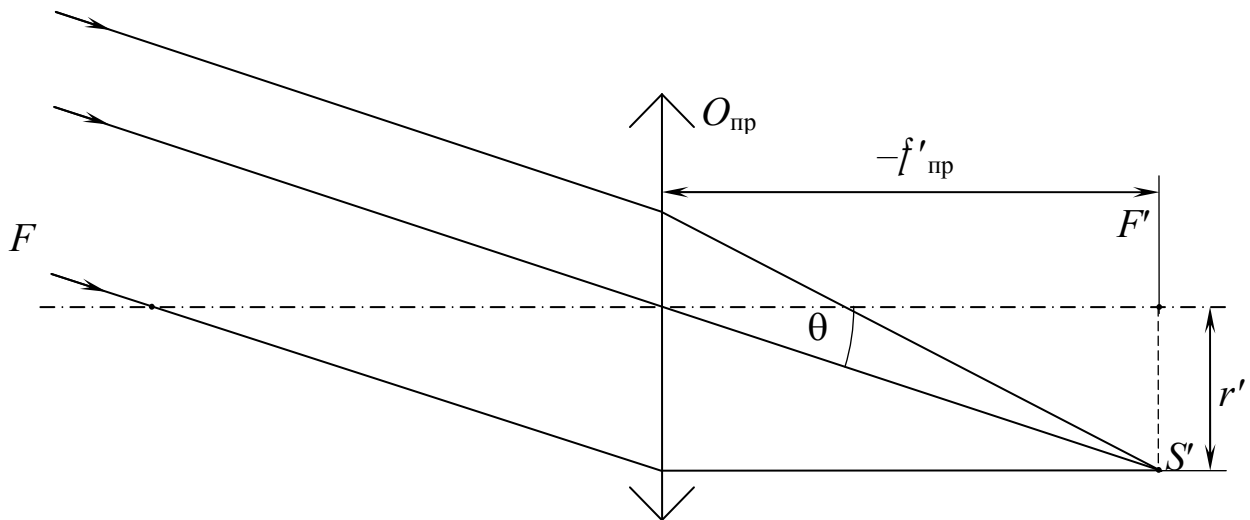


Рис. 5. Формирование изображения S' источника света S в задней фокальной плоскости приемного объектива.

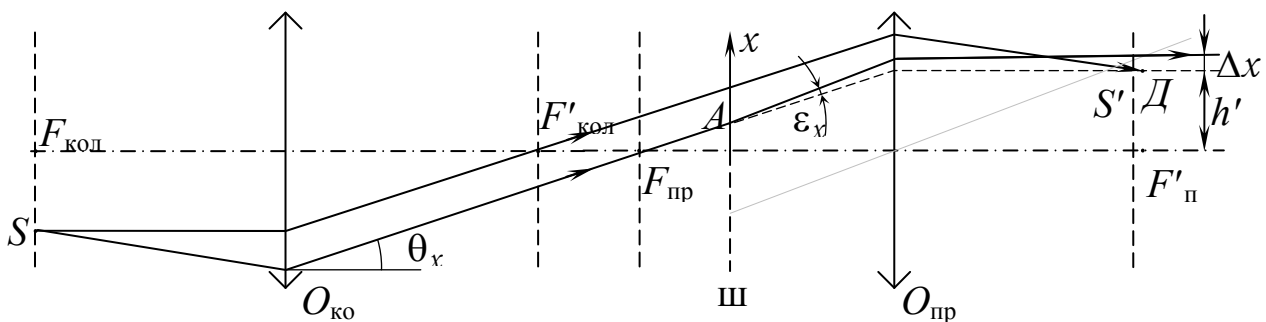


Рис. 6. Смещение изображения источника, обусловленное действием шлиры.

Из этих соотношений видно, что смещение луча в задней фокальной плоскости приемного объектива, обусловленное искривлением этого луча в шпире, дается соотношениями

$$\Delta x'_s = x''_s - x'_s = f'_{\text{пр}} \varepsilon_x(x, y); \quad \Delta y'_s = y''_s - y'_s = f'_{\text{пр}} \varepsilon_y(x, y); \quad (1)$$

как видим, оно не зависит ни от расстояния между шпирой и приемным объективом, ни от положения источника света S в передней фокальной плоскости коллиматора (если углы θ_x, θ_y) достаточно малы.

Протяженный источник света можно рассматривать как совокупность бесконечного числа точечных источников, от каждого из которых через рассматриваемую точку A шпирой пройдет по одному лучу. И к каждому из этих лучей применимы соотношения (1) для их смещения в задней фокальной плоскости приемного объектива. В отсутствие шпир эти лучи пришли бы каждый в свою точку основного изображения источника в фокальной плоскости приемного объектива, но данная точка A шпирой отклоняет их все в одну сторону на одинаковую величину. Эти отклоненные лучи создадут в фокальной плоскости приемного объектива дополнительное смещенное изображение источника света.

Установка для исследования прозрачных неоднородностей по методу Теплера состоит из следующих основных элементов (рис. 7):

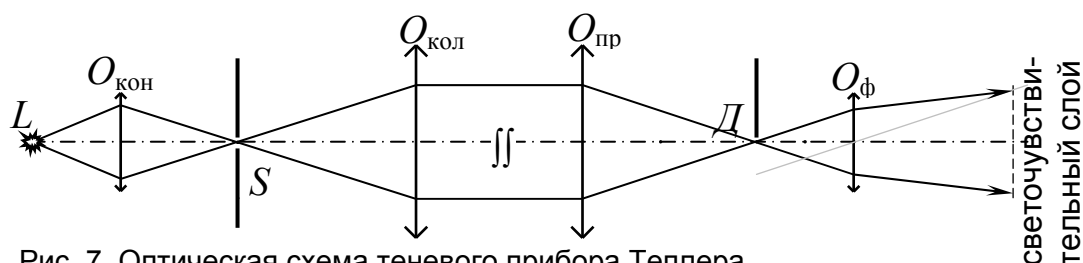


Рис. 7. Оптическая схема теневого прибора Теплера.
 L – электролампочка, $O_{\text{кон}}$ – конденсорный объектив, S – щель,
 $O_{\text{кол}}$ – коллиматорный объектив, $O_{\text{пр}}$ – приемный объектив,
 D – визуализирующая диафрагма,
 $O_{\text{ф}}$ – фотографический (проекционный) объектив.

- источника света S , в качестве которого обычно используют светящуюся щель, параллельную кромке ножа Фуко. Щель освещают электролампочкой L (накаливания или газоразрядной, в некоторых применениях – импульсной) через конденсорный объектив $O_{\text{кон}}$;
- длиннофокусного коллиматорного объектива $O_{\text{кол}}$ (фокусное расстояние до 2000 мм, реже более);

- приемного объектива $O_{пр}$ (обычно¹ с таким же фокусным расстоянием, как у коллиматора);
- визуализирующей диафрагмы (ножа Фуко или нити, решетки и др.);
- проекционного (фотографического) объектива $O_{ф}$;
- фотокамеры (или фотоэлектрической сканирующей системы регистрации).

Роль проекционного объектива для измерений столь же важна, как и роль приемного объектива с визуализирующей диафрагмой; если визуализирующая диафрагма (нож Фуко) позволяет измерять смещение изображения источника и с помощью соотношений (1) рассчитывать углы ε_x и ε_y отклонения лучей в неоднородности, то проекционный объектив позволяет на созданном им изображении определить, какие именно области неоднородности отклонили лучи на эти углы, и измерить координаты x' , y' изображений этих областей. Пересчитав по известному масштабу M изображения $x = x'/M$, $y = y'/M$, можно значениям функций $\varepsilon_x(x, y)$ и $\varepsilon_y(x, y)$ поставить в соответствие аргументы x, y этих функций. Проекционный объектив *совместно с приемным* создает на фотослое изображение неоднородности. Без визуализирующей диафрагмы прозрачные области исследуемого объекта однотонны и не видны, и нож Фуко или другая диафрагма, перекрывая часть лучей, обеспечивает теневое или полутеневое изображение объекта.

2. Метод узкой щели и нити

Для исследования стационарных неоднородностей или для *визуализации* нестационарных процессов с помощью теневого прибора Теплера (рис. 7) широко применяются методы, известные как метод щели и ножа, метод щели и нити. В обоих в качестве источника света используется ярко освещенная узкая (шириной $0.01 \div 0.05$ мм) щель. Ее изображение в фокальной плоскости приемного объектива представляет собой узкую яркую полосу. Рабочее поле теневого прибора (между коллиматорным и приемным объективом) при этом равномерно освещено, и равномерно освещенным на экране (или фотослое) оказывается изображение некоторой плоскости, пересекающей рабочее поле поперек оптической оси и отображаемой проекционным (фотографическим) объективом

¹ Для нашей установки не нашлось второго объектива с фокусным расстоянием 1600 мм, поэтому в качестве приемного использован объектив с фокусным расстоянием 500 мм.

совместно с приемным на экран (светочувствительный слой). Нить или кромка ножа Фуко располагаются параллельно кромкам щели.

Точность нахождения линии, отвечающей данному $\varepsilon_x(x, y) = h'/f'$, можно несколько повысить, используя вместо ножа Фуко тонкую непрозрачную нить (немного большей толщины, чем ширина щели 0.01÷0.05 мм): искомая линия будет проходить примерно посередине тени, а сама тень будет представлять собой полосу, ширина которой тем меньше, чем быстрее изменяется от точки к точке объекта угол отклонения, и чем тоньше нить (и соответственно уже щель); последнее справедливо до предела, устанавливаемого дифракционными ограничениями.

Если на пути светового пучка в рабочем поле теневого прибора окажется оптическая неоднородность—исследуемый объект (рис. 6), и некоторый участок его (с координатами x, y) отклонит свет в направлении, проекции которого на плоскости XZ и YZ составят углы $\varepsilon_x(x, y)$ и $\varepsilon_y(x, y)$ с осью Z , направленной вдоль оптической оси прибора, то это приведет к смещению изображения щели (но только теми лучами, которые проходят через упомянутый участок) на расстояние $f' \varepsilon_x(x, y)$ в направлении оси x , перпендикулярной кромке ножа Фуко, и на аналогичную величину в направлении оси Y , параллельной нити (смещение по оси Y нас не интересует, поскольку при данной ориентации щели и нити оно не может быть измерено).

Пусть нить проходит в фокальной плоскости приемного объектива параллельно изображению щели пренебрежимо малой ширины так, что расстояние от нити до оптической оси равно $h' > 0$ (рис. 6). При этом нить перекрывает лучи, проходящие через фокальную плоскость лишь на расстоянии h' от оптической оси.

В отсутствие нити все лучи (как отклоненные, так и нет) собираются проекционным объективом (совместно с приемным) в соответствующие точки теневого изображения на фотослое: поскольку плоскость фотослоя сопряжена с определенной плоскостью в рабочем поле теневого прибора, каждая точка последней отображается в соответствующую точку экрана по законам геометрической оптики, независимо от того, отклонен луч неоднородностью или нет, если только отклоненный луч не пройдет мимо приемного объектива.

Области исследуемого объекта, которые отклоняют лучи на углы, большие или меньшие $\varepsilon_x(x, y) = h'/f'$, будут отображаться

светлыми, а области, отклоняющие лучи на углы $\varepsilon_x(x, y) = h'/f'$, окажутся в изображении темными, поскольку соответствующие лучи перекрываются нитью. Тень в изображении отвечает углу отклонения $\varepsilon_x(x, y) = h'/f'$. Зная положение нити относительно заднего фокуса приемного объектива при фотографировании, мы по полученной фотографии находим линии, представляющие собой множества точек объекта, отклонивших лучи на этот угол ε_x . Таких линий может быть не одна, но каждая на них замкнута, если объект полностью помещается в рабочее поле и его показатель преломления изменяется непрерывным образом.

Сместим нить на малое расстояние. Соответственно сместится тень в изображении исследуемого объекта в положение, отвечающее новому ε_x . Получив множество фотографий стационарного исследуемого объекта при различных положениях нити, мы по ним сможем восстановить семейство линий $\varepsilon_x = \text{const}$, т. е. по сути – искомое поле углов отклонения лучей $\varepsilon_x(x, y)$.

Чувствительность метода щели и нити определяется шириной щели: реальная тень оказывается несколько размытой полутенью, получаемой из-за конечной ширины щели, и дифракционных явлений. Наименьшая разумная ширина щели определяется следующими факторами:

- точностью изготовления кромок щели и нити;
- требованием пропустить световой поток, достаточный для наблюдения и регистрации теневой картины;
- дифракционным размытием границы света и тени – при некоторой ширине щели дальнейшее ее уменьшение не приведет к увеличению резкости границы света и тени.

Наличие полутени приводит и к снижению точности измерения положения области, отклоняющей свет на угол ε_x – данному ε_x отвечает приблизительно середина тени.

Метод щели и нити может применяться при исследовании и нестационарных объектов, но только лишь для визуализации неоднородностей, поскольку не позволяет восстановить по одной фотографии все поле углов отклонения $\varepsilon_x(x, y)$.

3. Порядок проведения эксперимента.

Юстировка теневого прибора Теплера

1. Установите шайбу с нитью в оправу, закрепленную на столике с микрометрическим поперечным перемещением, выбрав вертикальную ориентацию нити.
2. Установите требуемую по условиям задачи вертикальную ориентацию осветительной щели на длиннофокусном коллиматоре.
3. Включите осветитель и отрегулируйте освещение щели:
 - расположите источник света на одной высоте с щелью;
 - установите конденсор между источником света и щелью так, чтобы в плоскости щели отображалась в виде резко очерченного круга коллекторная линза осветителя;
 - перемещением источника света и конденсора добейтесь такого масштаба изображения коллекторной линзы в плоскости щели, чтобы его диаметр был чуть больше длины (высоты) щели, и светящийся круг изображения полностью ее перекрывал;
 - перемещением патрона с лампой в осветителе относительно корпуса (и коллекторной линзы) добейтесь наиболее равномерной освещенности изображения коллекторной линзы в плоскости щели.
4. Расположите на оптической скамье горизонтальный микроскоп позади столика с визуализирующей диафрагмой. Перемещением микроскопа добейтесь появления в поле зрения микроскопа сначала размытого, затем резкого изображения осветительной щели. Зафиксируйте микроскоп в таком положении.
5. Поперечным перемещением микрометрического столика с обоймой, в которой закреплена визуализирующая диафрагма, и продольным перемещением обоймы выведите в поле зрения микроскопа изображение кромки визуализирующей диафрагмы (ножа, нити и т. п.) и добейтесь его резкости, не меняя прежней настройки микроскопа. В результате должны быть одновременно резко видны осветительная щель и кромка визуализирующей диафрагмы. При необходимости улучшить резкость изображения осветительной щели фокусировка производится перемещением микроскопа; улучшать резкость

изображения кромки визуализирующей диафрагма следует только продольным перемещением обоймы, в которой она закреплена.

6. Уберите со станины горизонтальный микроскоп и расположите на его месте столик (держатель) с фотоаппаратом. Найдите в пространстве между длиннофокусным коллиматором и приемным объективом плоскость, сопряженную с плоскостью фотослоя. Транспарант или текст, помещенный в эту плоскость, если он хорошо освещен, будет наиболее отчетливо виден в видоискатель фотоаппарата. В эксперименте на место транспаранта устанавливается исследуемый объект.

Получение теневой картины

1. Проверьте юстировку теневого прибора. Рекомендуемая ширина щели 0.05 мм (проверьте положение нуля шкалы на маховичке регулировки ширины щели). В качестве визуализирующей диафрагмы используется нить.
2. Установите в рабочем поле теневого прибора на столике исследуемый объект – в данной работе это длиннофокусная линза.
3. Наблюдая теневую картину в видоискатель фотоаппарата, перемещайте нить посредством механизма поперечного перемещения столика с нитью сначала в одну сторону, затем в другую до полного просветления всего поля; для обоих положений столика снимите отсчеты по шкалам механизма его перемещения; пусть это будут ξ_0 и ξ_m . Расстояние $\xi_m - \xi_0$ (в мм) разделите на 36 (по числу кадров на фотопленке) и округлите в сторону увеличения до двух знаков после запятой:

$$\text{Целое}((\xi_m - \xi_0) \cdot 100 / 36) / 100 = \Delta\xi.$$

4. Найдите таким же путем положение нити, при котором фон (область изображения за пределами исследуемой неоднородности) становится темным; при этом нить проходит вдоль середины изображения осветительной щели; снимите отсчет ξ_c по тем же шкалам.
5. Сфотографируйте теневую картину при положениях визуализирующей диафрагмы с координатами ξ_c , $\xi_c + \Delta\xi$, $\xi_c + 2\Delta\xi$, $\xi_c + 3\Delta\xi, \dots$, пока не будет $\xi_c + k \Delta\xi > \xi_m$, и при $\xi_c - \Delta\xi$, $\xi_c - 2\Delta\xi, \dots$, пока $\xi_c - k \Delta\xi \geq \xi_0$. Запишите, какому по счету кадру соответствует какая координата ξ_k нити.

6. Уберите линзу и поставьте на ее место масштабный цилиндр диаметром $10 \div 20$ мм, подсветите его и сфотографируйте с теми же параметрами фотоаппарата. Измерьте диаметр масштабного цилиндра d .
7. Скопируйте полученные фотографии на жесткий диск компьютера.
8. В графическом редакторе на компьютере, позволяющем создавать многослойные изображения (Gimp, Photoshop и т. п.), откройте одно из полученных изображений (примерно из середины полученной последовательности). Затем откройте первое изображение из полученной серии, скопируйте его в буфер обмена и вставьте вторым слоем на ранее открытое изображение, переименуйте этот слой, присвоив ему в качестве имени номер файла, входящий в имя файла; закройте ставшее уже ненужным изображение для освобождения памяти компьютера; далее аналогичным образом последовательно наложите новыми слоями все оставшиеся изображения. Перемещением слоев относительно базового слоя добейтесь совмещения изображений, ориентируясь на видимые границы освещенной области. Для каждого слоя в таблице укажите номер файла и угол отклонения ε_x , который соответствует середине темной линии $\varepsilon_x = \text{const}$: $\varepsilon_x = h'/f'_{\text{пр}}$, где $h' = k\Delta\xi$, k – целое. Получаемое семейство линий описывает искомое поле углов отклонения лучей исследуемым объектом.

Обмер теневой картины и обработка результатов обмера.

1. Измерьте диаметр изображения масштабного цилиндра d' .
2. Определите масштаб изображения $M = d'/d$.
3. Проведите отсчетную прямую через центр теневого изображения линзы перпендикулярно линиям $\varepsilon_x = \text{const}$.
4. Измерьте вдоль нее координаты x'_i центров каждой из теневых линий $(\varepsilon_x)_i = \text{const}$.
5. Постройте графики $\varepsilon_x(x_i)$, где $x_i = x'_i / M$. Экспериментальные точки должны укладываться на прямую. Методом наименьших квадратов найдите наклон этой прямой и погрешность этого наклона, по ним рассчитайте фокусное расстояние линзы $f'_л$: $\varepsilon_x = x / f'_л$, откуда $f'_л = x / \varepsilon_x$.

6. Оцените чувствительность методов и погрешность измерений координаты x и углов отклонения ε , а также нахождения фокусного расстояния линзы.

Контрольные вопросы

1. Какова роль приемного объектива в теновом прибора Теплера?
2. Какую роль играет ширина щели в методе щели и нити?
3. Каково назначение проекционного объектива в использованном методе?
4. Как формируется в изображении тень (построить геометрический ход лучей по правилам построения изображений, используя фокусы объективов и их узловые–центральные–точки)?
5. Какие плоскости рассмотренного тенового прибора являются сопряженными?
6. Оцените диапазон измерений углов отклонения в Вашей работе по диапазону перемещения нити.
7. К чему приведет использование более длиннофокусного или короткофокусного приемного объектива в теновом прибора Теплера?
8. Как можно найти поправку в показания измерительного барабана, показывающего ширину щели коллиматора?
9. Можно ли в принципе обойтись без отдельного проекционного объектива в использованном методе?

Литература

1. Васильев Л.А. Теневые методы. –М.: Наука, 1968. –400 с.: ил.
2. Зимин В.Д. Оптические метода исследования прозрачных неоднородностей: учеб, пособие по спецкурсу. Пермь: Изд. Пермского ун-та, 1976.–92 С.: ил.
3. Хауф В., Григуль У. Оптические методы в теплопередаче. М.: Мир, 1973. –240 с.: ил.