

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 НОЖА ФУКО

Методические указания к лабораторной работе № 4

БАРНАУЛ–2010

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

Сборка и юстировка теневой установки по методу щели и ножа Фуко: 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, 14 с.

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

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

Сборка и юстировка теневой установки по методу щели и ножа Фуко

Цель работы: ознакомление с количественными теплеровскими методами исследования стационарных неоднородностей, приобретение навыков юстировки прибора.

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 ножом Фуко, шайба с ножом Фуко, линза с удлинительными кольцами (используется в качестве фотографического объектива), фотоаппарат, горизонтальный микроскоп.

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 ножа Фуко.

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 испытуемого 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. Если 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

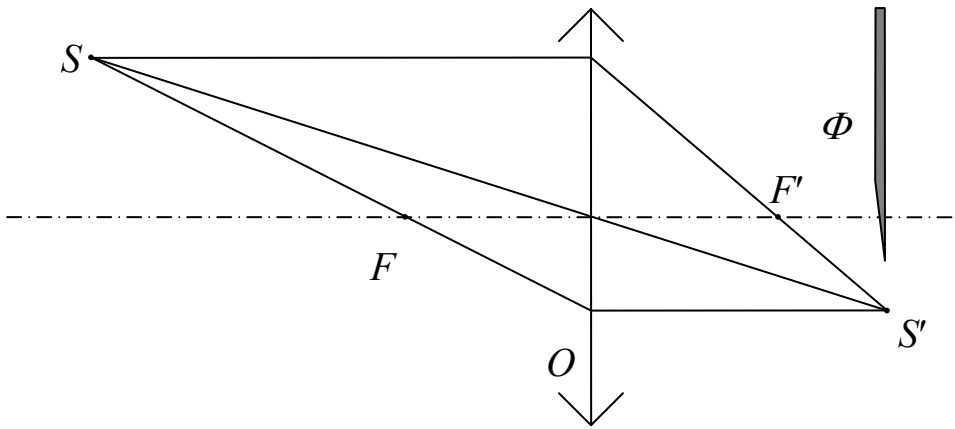


Рис. 1. Оптическая схема теневого метода Леона Фуко.
 S - точечный источник света, S' - его изображение, O - объектив, F и F' - его передний и задний фокусы., Φ - нож Фуко.

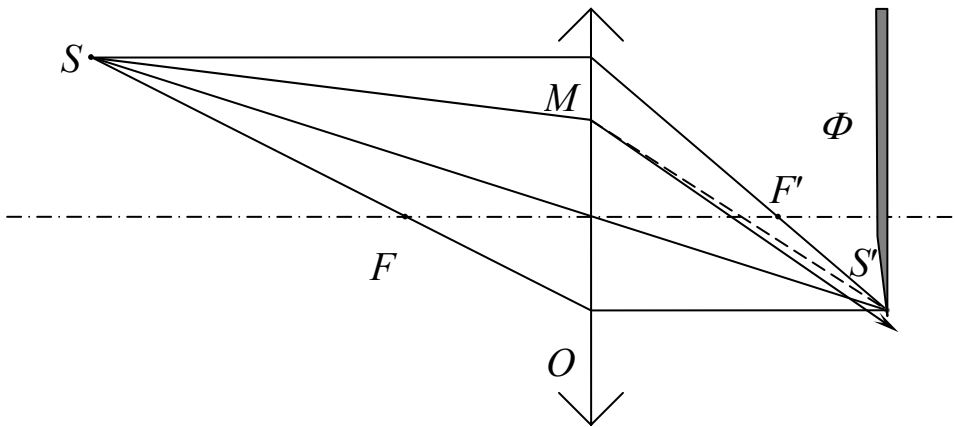


Рис. 2. Прохождение света через дефектную область объектива.
 Пунктиром изображён луч в отсутствие дефектной области.

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 любой 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 ис-

точника света, они тоже будут перекрыты ножом (рис. 3). Поэтому светлыми на темном фоне будут выглядеть лишь те дефектные области, которые отклонили лучи в соответствующую сторону на больший угол.

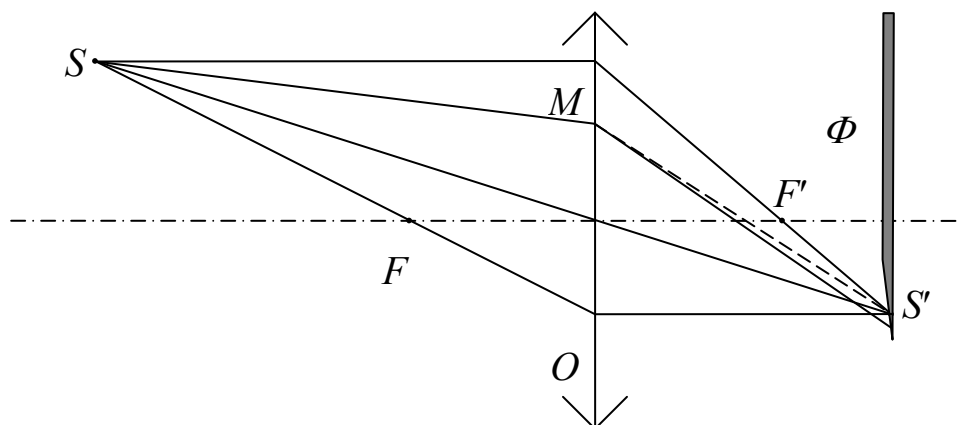


Рис. 3. Прохождение света через дефектную область объектива, отклоняющую свет в сторону ножа Фуко. Все лучи перекрыты ножом.

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.

Если точечный источник света заменить протяженным, его изображение будет перекрываться ножом Фуко не сразу, а постепенно ввиду конечности его размеров. Поэтому теневая картина

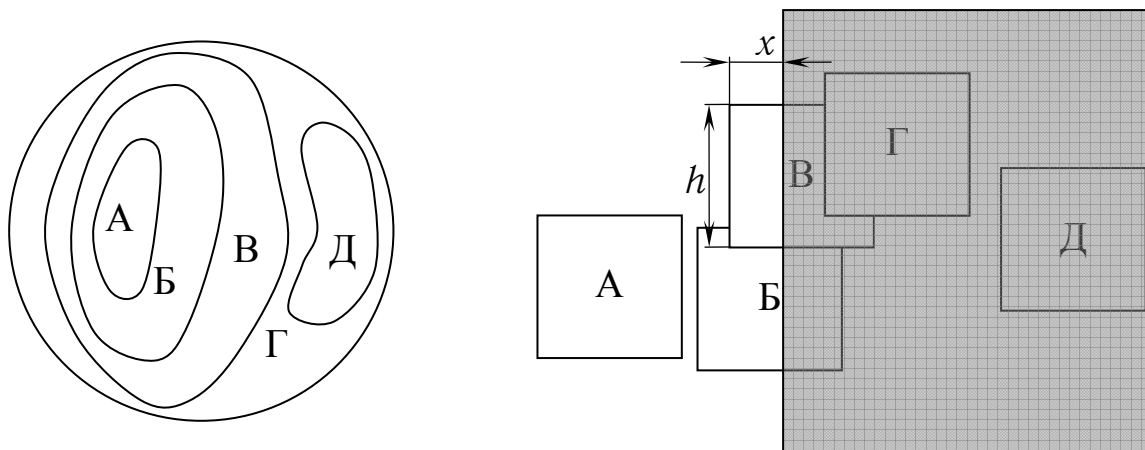


Рис. 4. Отклонение изображения прямоугольного источника света различными областями дефектного объектива. Слева – объектив с дефектными областями в плане, справа – плоскость изображения.

будет содержать полутени, освещенность которых зависит от угла отклонения лучей, а также формы и размеров источника света. Источник в виде широкой равномерно освещенной щели применяется для исследования распределения углов отклонения света динамическими объектами.

Допустим, оптически неоднородные области исследуемого объекта (рис. 4) А, Б, Г, Д отклоняют лучи от первоначальных направлений каждая на свой определенный угол; область В однородна. Тогда каждая область совместно с приемным объективом построит свое изображение протяженного источника (на рис. 4 прямоугольники А, Б, В, Г, Д представляют изображения протяженного источника света, имеющего ту же форму), и если смотреть через приемный объектив со стороны ножа Фуко, разные места исследуемой неоднородности будут различаться по освещенности. Область Д, дающая крайнее правое изображение, будет выглядеть совершенно темной, область А – наиболее светлой, освещенности областей Б, В и Г будут промежуточными между освещенностями областей А (наибольшая) и Д (освещенность равна нулю), причем область В будет светлее, чем область Г, и темнее, чем область Б.

Как видим, по освещенности различных областей можно судить о том, насколько сильно она изменяет ход лучей против первоначального. Освещенность каждой точки изображения пропорциональна световому потоку, достигающему изображения, то есть проходящему мимо ножа Фуко, а световой поток (при условии его однородности в плоскости ножа Фуко) пропорционален площади его поперечного сечения. Площадь поперечного сечения светового

потока, проходящего мимо ножа Фуко, равна произведению высоты h изображения источника и ширины x его открытой части, которая, в свою очередь, линейно зависит от угла ε_x отклонения лучей неоднородностью. Таким образом, освещенность данной точки теневого изображения окажется линейно зависящей от угла отклонения ε_x . Это обстоятельство используется в фотометрическом методе широкой щели и ножа Фуко.

2. Оптическая схема теневого прибора Теплера

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.

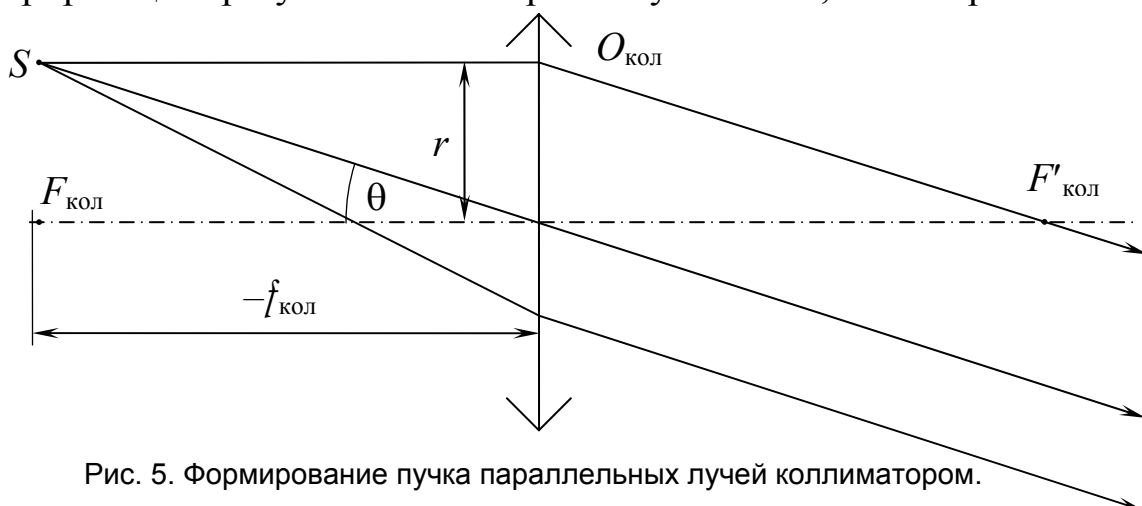


Рис. 5. Формирование пучка параллельных лучей коллиматором.

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 плоскости относительно переднего фокуса $F_{\text{кол}}$ определяет наклон пучка параллельных лучей относительно оптической оси коллиматора (рис. 5): $\text{tg } \theta = r/f'_{\text{кол}}$ (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 прием-

ного объектива в точке S' (рис. 6) на расстоянии $r = f'_{\text{пр}} \operatorname{tg} \theta$ 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 шлифу (исследуемый объект), она будет отклонять световые лучи, причем разные участки шлифу будут отклонять лучи на разные углы.

Пусть один из лучей вошел в шлифу в точке A (рис. 7), прошел сквозь нее и пересек прилегающую к ней плоскость, перпендикулярную оптической оси и отображаемую проекционным объективом (совместно с приемным) на экран (или фотослой), в точке с координатами $x, y, z_{\text{ш}}$. 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

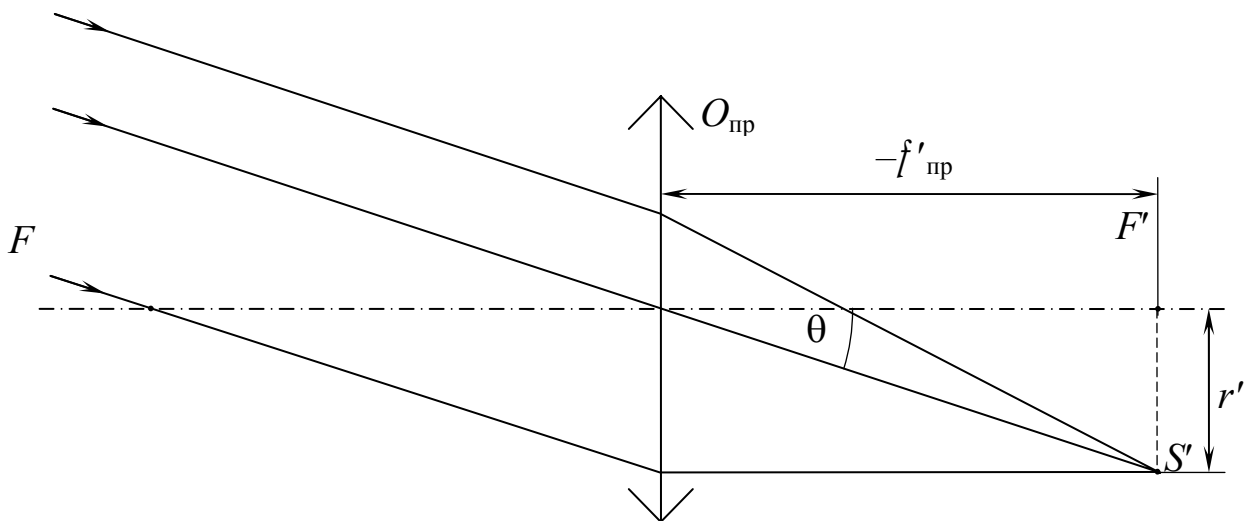


Рис. 6. Формирование изображения S' источника света S в задней фокальной плоскости приемного объектива.

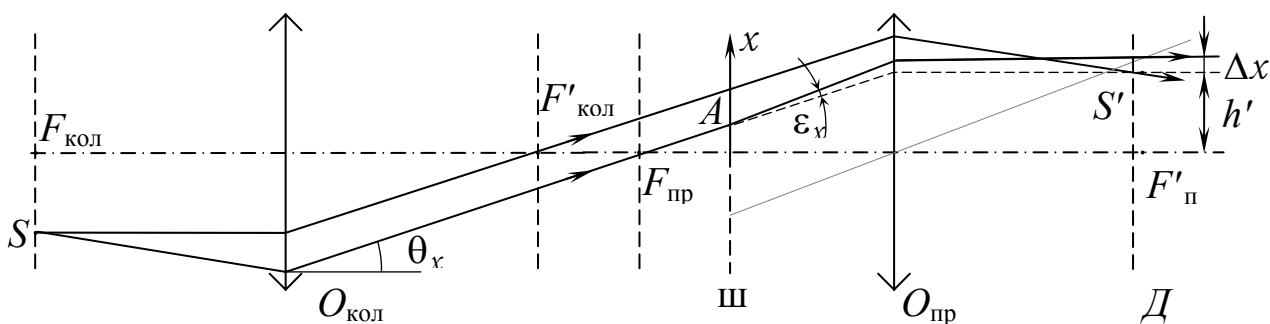


Рис. 7. Смещение изображения источника, обусловленное действием шлифу.

$\theta_x + \varepsilon_x(x, y)$ и $\theta_y + \varepsilon_y(x, y)$. Если прошедшие мимо шлиры лучи собираются в задней фокальной плоскости приемного объектива в точке с координатами

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

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

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

Из этих соотношений видно, что смещение луча в задней фокальной плоскости приемного объектива, обусловленное искривлением этого луча в шлире, 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 шлирой 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 шлиры пройдет по одному лучу. И к каждому из этих лучей применимы соотношения (1) для их смещения в задней фокальной плоскости приемного объектива. В отсутствие шлиры эти лучи пришли бы каждый в свою точку основного изображения источника в фокальной плоскости приемного объектива, но данная точка A шлиры 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. 8):

- источника света S , в качестве которого обычно используют освещенную 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);

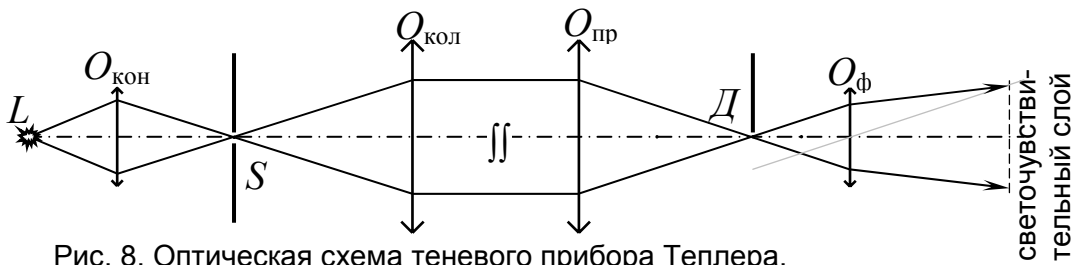


Рис. 8. Оптическая схема теневого прибора Теплера.

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.

- приемного объектива $O_{\text{пр}}$ (обычно с таким же фокусным расстоянием, как у коллиматора¹);
- визуализирующей диафрагмы (нож Фуко или нити, решетки и др.);
- проекционного (фотографического) объектива $O_{\text{ф}}$;
- 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 теньное или полутеньное изображение объекта.

3. Метод узкой щели и ножа Фуко

Для исследования стационарных неоднородностей или для визуализации нестационарных процессов с помощью теневого прибора Теплера (рис. 8) широко применяются методы, известные как

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

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 полоску. Рабочее поле теневого прибора (между коллиматорным и приемным объективом) при этом равномерно освещено, и равномерно освещенным на экране (или светочувствительном слое) оказывается изображение некоторой плоскости, пересекающей рабочее поле поперек оптической оси и отображаемой проекционным (фотографическим) объективом совместно с приемным на экран (фотослой). Кромка ножа Фуко располагается параллельно кромкам щели.

Если на пути светового пучка в рабочем поле теневого прибора окажется оптическая неоднородность—исследуемый объект, 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 кромке ножа (смещение по оси Y нас не интересует, поскольку при данной ориентации щели и ножа оно не может быть измерено).

Сдвинем нож Фуко в фокальной плоскости приемного объектива так, чтобы его кромка проходила по изображению щели (шириной щели пренебрегаем). Пусть расстояние от кромки ножа до оптической оси равно при этом $h' > 0$. Очевидно, возможны два случая:

- 1) нож не перекрывает лучи, проходящие дальше кромки ножа (при $x > h'$), и стоит на пути остальных лучей;
- 2) нож перекрывает лучи, направленные дальше кромки ножа (при $x > h'$), и не перекрывает другие лучи.

Все отклоненные и неотклоненные лучи собираются проекционным объективом (совместно с приемным) в соответствующие точки теневого изображения на экране или фотослое: поскольку плоскость экрана (фотослая) сопряжена с определенной плоскостью в рабочем поле теневого прибора, каждая точка последней отображается (по законам геометрической оптики) в соответствующую точку экрана, независимо от того, отклонен луч неоднородно-

стью или нет, если только отклоненный луч не пройдет мимо приемного объектива.

В первом случае области исследуемого объекта, которые отклоняют лучи на углы, превышающие $\varepsilon_x(x, y) = h'/f'$, будут отображаться светлыми, а области, отклоняющие лучи на углы $\varepsilon_x(x, y) < h'/f'$, окажутся в изображении темными. Во втором случае—наоборот. Резкая граница света и тени в изображении отвечает углу отклонения $\varepsilon_x(x, y) = h'/f'$. Зная положение ножа Фуко относительно заднего фокуса приемного объектива при фотографировании, мы по полученной фотографии находим линию—резкую границу света и тени, представляющую собой множество 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 нож Фуко в том же направлении, что и раньше, на малое расстояние. Соответственно сместится резкая граница света и тени в изображении исследуемого объекта в положение, отвечающее новому ε_x . Получив множество фотографий стационарного исследуемого объекта при различных положениях ножа Фуко, мы по ним сможем восстановить семейство линий $\varepsilon_x = \text{const}$, то есть по сути—искомое поле углов отклонения лучей $\varepsilon_x(x, y)$.

Чувствительность метода щели и ножа определяется шириной щели: реальная граница света и тени 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 ножа Фуко;
- 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 границы света и тени—данному ε_x отвечает приблизительно половинный уровень освещенности изображения между уровнями освещенности светлых и темных областей, что визуально

определяется с немалой погрешностью; фотометрирование же изображения усложняет измерения.

Точность нахождения линии, отвечающей данному $\varepsilon_x(x, y) = h'/f'$, можно несколько повысить, используя тонкую непрозрачную нить (немного большей толщины, чем ширина щели $0.01 \div 0.05$ 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.

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

4. Порядок проведения эксперимента. Юстировка теневого прибора Теплера

1. Установите шайбу с ножом Фуко в оправу, закрепленную на столике с микрометрическим поперечным перемещением, выбрав вертикальную ориентацию кромки ножа.
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 отобразилась 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 диафрагмы следует только продольным перемещением обоймы, в которой она закреплена.
6. Уберите со станины горизонтальный микроскоп и расположите на его месте столик (держатель) с фотоаппаратом. Отдвиньте последний немного назад, чтобы перед ним при необходимости можно было разместить еще один рейтер со столиком или держателем, не меняя положения визуализирующей диафрагмы. 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 видоискателе фотоаппарата. В эксперименте на место транспаранта устанавливается исследуемый объект.

Контрольные вопросы

1. Какова роль приемного объектива в теновом приборе Теплера?
2. Какую роль играет ширина щели в методе щели и ножа Фуко?
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 теневого прибора являются сопряженными?
6. Оцените диапазон измерений углов отклонения в Вашей работе по диапазону перемещения ножа Фуко.

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.