

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 НАКЛОННОЙ НИТИ

Методические указания к лабораторной работе № 1

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

Сборка и юстировка теневой установки по методу щели и наклонной нити: 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 наклонной нити, излагается порядок выполнения работы. Даются контрольные вопросы, приводится список литературы. Описана методика юстировки теневого прибора по методу щели и наклонной нити.

Предназначено для студентов специальности 010701.65 «физика» специализации «теплофизика». Ил. 10. Библиогр. 3.

Сборка и юстировка теневой установки по методу щели и наклонной нити

Цель работы: ознакомление с модификацией теневого метода Теллера–теневым методом наклонной нити (или щели) и цилиндрической линзы, приобретение навыков юстировки теневого прибора.

Оборудование: оптическая скамья с размещенными на ней осветителем, конденсором, длиннофокусным коллиматором (фокусное расстояние $f' = 1600$ мм) с щелью, поворотным столиком для установки исследуемого объекта, приемным объективом ОТ-500 (фокусное расстояние $f' = 500$ мм), микрометрическим столиком, на котором располагается обойма с наклонной нитью, держателем с цилиндрической линзой, столиком, на котором закреплен фотоаппарат с длиннофокусной линзой в специальном тубусе; горизонтальный микроскоп.

Введение

Метод щели и наклонной нити позволяет исследовать одномерные объекты, в которых плотность жидкости или газа изменяется вдоль одной декартовой координаты. Этим методом можно исследовать одномерные процессы диффузии и теплопередачи. В настоящей работе выполняется юстировка теневого прибора для последующего его использования по методу щели и наклонной 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 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 изо-

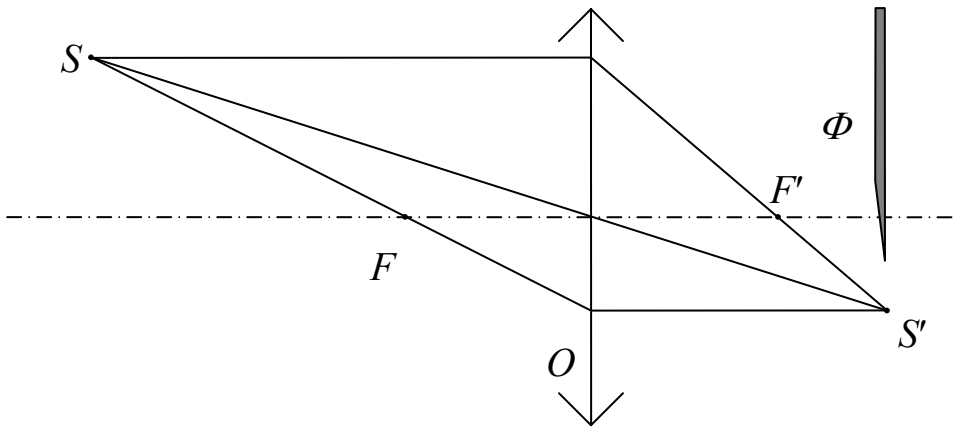


Рис. 1. Оптическая схема теневого метода Леона Фуко.
 S - точечный источник света, S' - его изображение, O - объектив, F и F' - его передний и задний фокусы., Φ - нож Фуко.

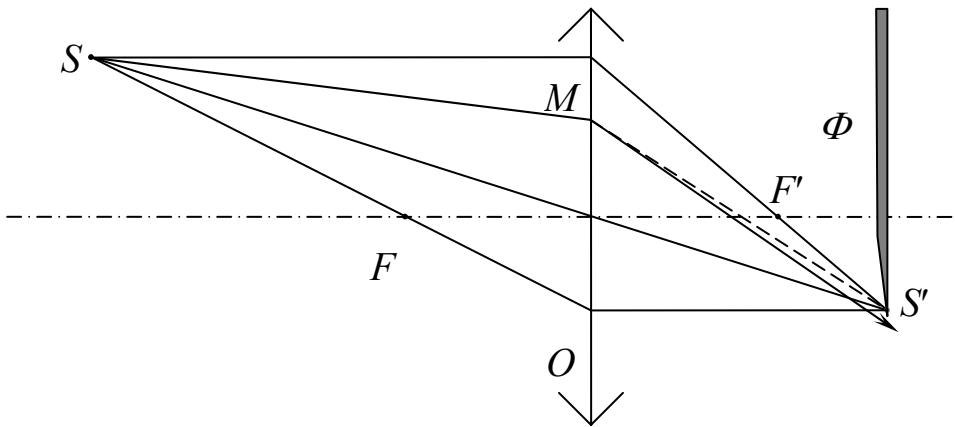


Рис. 2. Прохождение света через дефектную область объектива.
 Пунктиром изображён луч в отсутствие дефектной области.

бражение 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 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 источника 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.

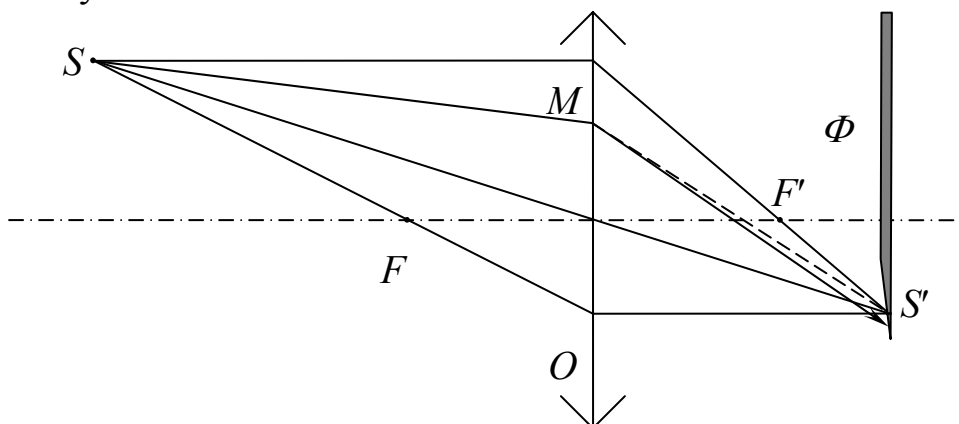


Рис. 3. Прохождение света через дефектную область объектива, отклоняющую свет в сторону ножа Фуко. Все лучи перекрыты ножом.

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.

Теневая установка по методу Теплера может иметь один основной (приёмный) объектив, как на рис. 1–3, но удобнее для ин-

терпретации 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 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).

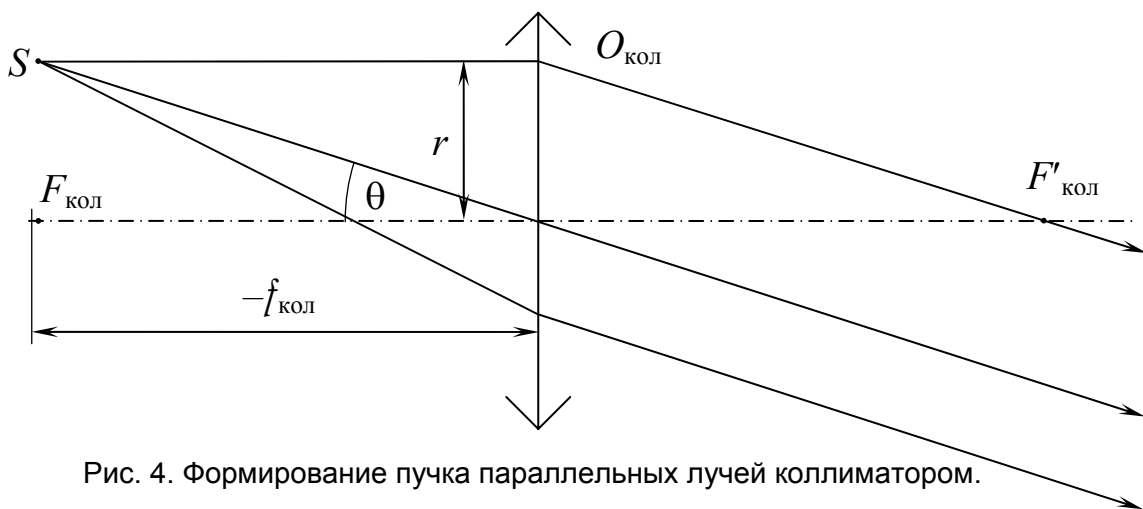


Рис. 4. Формирование пучка параллельных лучей коллиматором.

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 шпирю (исследуемый объект), она будет отклонять световые лучи, причем разные участки шпирю будут отклонять лучи на разные углы. Пусть один

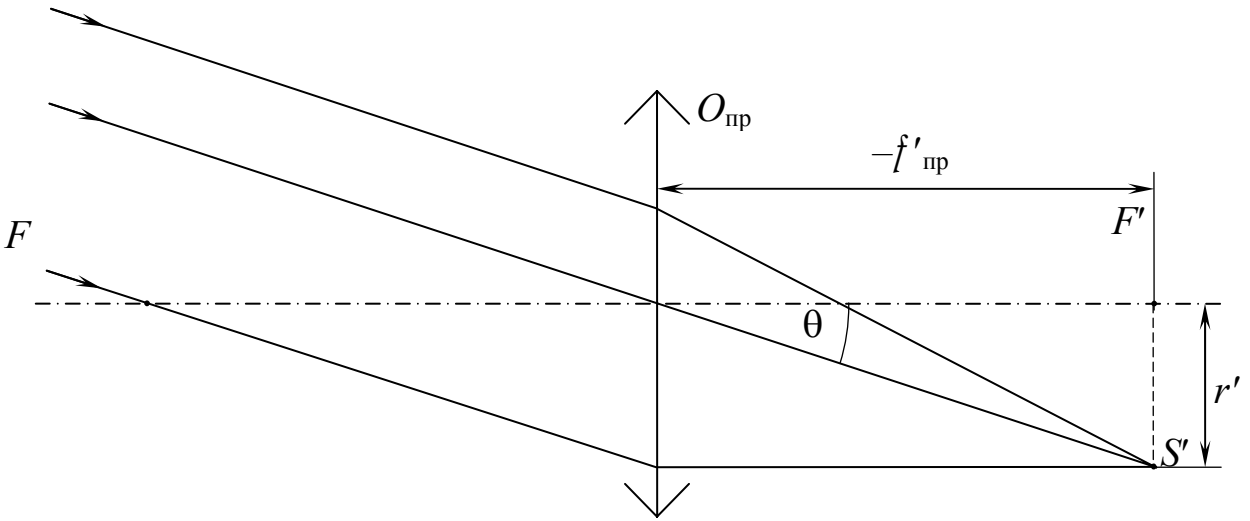


Рис. 5. Формирование изображения S' источника света S в задней фокальной плоскости приемного объектива.

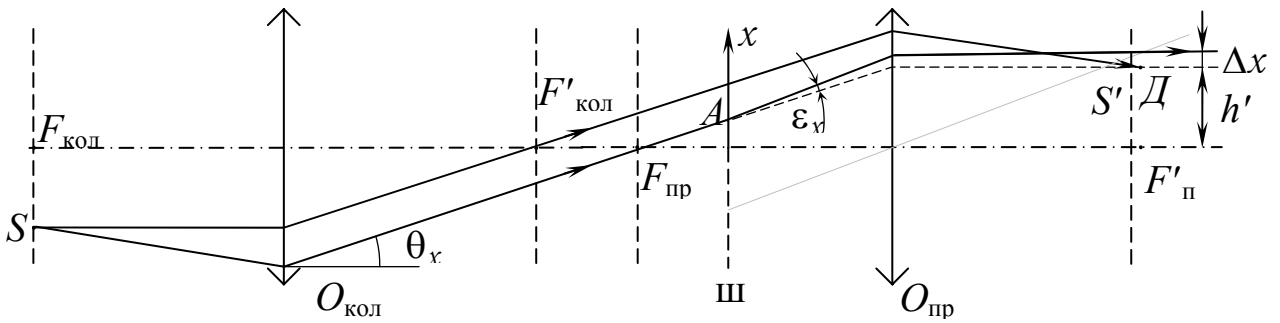


Рис. 6. Смещение изображения источника, обусловленное действием шлиры.

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 $\theta_x + \epsilon_x(x, y)$ и $\theta_y + \epsilon_y(x, y)$. 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

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

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 шпирой 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.

2. Оптическая схема теневого прибора Теплера

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

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

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

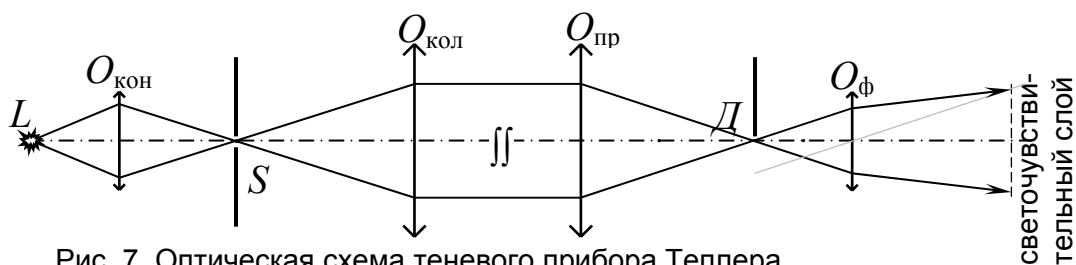


Рис. 7. Оптическая схема теневого прибора Теплера.
 L —электролампочка, $O_{\text{кон}}$ —конденсорный объектив, S —щель,
 $O_{\text{кол}}$ —коллиматорный объектив, $O_{\text{пр}}$ —приемный объектив,
 D —визуализирующая диафрагма,
 $O_{\text{ф}}$ —фотографический (проекционный) объектив.

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.

3. Метод наклонной нити (щели) и цилиндрической линзы

Метод применяется для исследования прозрачного объекта, показатель преломления которого зависит от одной декартовой координаты.

Осветительную щель (источник света), находящуюся в передней фокальной плоскости коллиматорного объектива, ориентируют так, чтобы направление отклонения лучей в исследуемом объекте было перпендикулярным осветительной щели. Примем для определенности, что изменение показателя преломления в исследуемом объекте происходит в вертикальном направлении, тогда осветительная щель ориентируется горизонтально.

Исследуемый объект располагают так же, как и в других разновидностях метода Теплера – в параллельных лучах в рабочем пространстве прибора между коллиматорным и приемным объективами.

В качестве визуализирующей диафрагмы используется наклоненная по отношению к осветительной щели нить (или щель; в дальнейшем говорим только о наклонной нити, имея в виду, что с таким же успехом может использоваться и наклонная щель). Наклонная нить располагается в задней фокальной плоскости приемного объектива перпендикулярно оптической оси установки. Она должна составлять с изображением осветительной щели угол $\alpha = 15 \div 75^\circ$ в зависимости от требуемой чувствительности метода.

Приемный объектив собирает лучи с одинаковым наклоном в общие точки в задней фокальной плоскости, и в то же время создает мнимое промежуточное изображение исследуемого прозрачного объекта (невидимое без визуализирующей диафрагмы)

Проекционный (фотографический) объектив отображает, как обычно в методе Теплера, это промежуточное изображение в плоскость экрана или фотослоя в фотокамере. Но поскольку в горизонтальном направлении объект своих свойств не меняет, достаточно получить на фотослое его одномерное вертикальное изображение.

В горизонтальном направлении можно получить изображение визуализирующей диафрагмы – наклонной нити. С этой целью между наклонной нитью и фотообъективом (рис. 7) устанавливают цилиндрическую линзу (рис. 8) с вертикальной ориентацией ее оси симметрии. Такая линза практически не меняет ход лучей в вертикальном направлении (как плоско-параллельная пластина), а в горизонтальном направлении изменяет подобно обычной линзе. Подбором цилиндрической линзы (с подходящими размерами и фокусным расстоянием) и ее положения – продольным перемещением

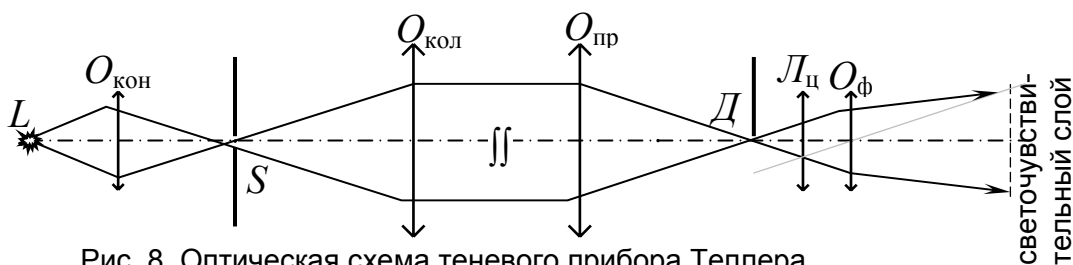


Рис. 8. Оптическая схема теневого прибора Теплера.
L – электролампочка, *O_{кон}* – конденсорный объектив, *S* – щель,
O_{кол} – коллиматорный объектив, *O_{пр}* – приемный объектив,
D – визуализирующая диафрагма, *L_ц* – цилиндрическая линза
O_ф – фотографический (проекционный) объектив.

вдоль оптической оси—нужно получить изображение освещенного щелью участка наклонной нити в плоскости фотослоя и добиться его резкости. В построении изображения нити принимают участие и цилиндрическая линза, и фотообъектив.

Пока исследуемого объекта в рабочем поле прибора нет, в задней фокальной плоскости приемного объектива будет несмещенное и неискаженное горизонтально расположенное изображение осветительной щели. Малый участок наклонной нити будет перекрывать малый же участок изображения осветительной щели. Если бы линза была не цилиндрической, а обычной, со сферическими поверхностями, в плоскости фотослоя наблюдалась бы картина, аналогичная приведенной на рис. 9а, причем на темном фоне наблюдалось бы яркое изображение осветительной щели, перекрытое в одном месте наклонной нитью. Цилиндрическая же линза не фокусирует лучи, расходящиеся в вертикальном направлении, поэтому эта светлая полоса с маленькой ромбовидной тенью размывается в вертикальном направлении в светлую полосу с темной вертикальной же полоской на ней (рис. 9б). Ширина темной полоски определяется шириной нити, шириной осветительной щели и углом наклона нити относительно щели.

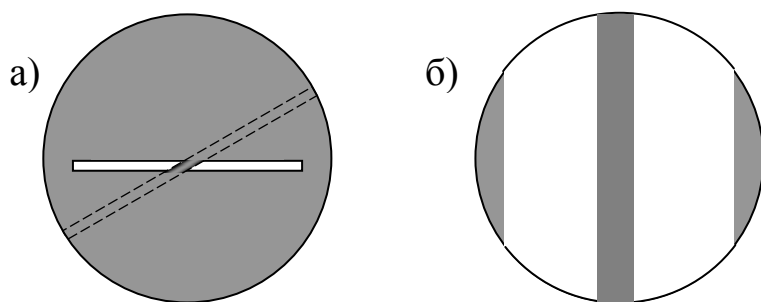


Рис. 9. Отображение фокальной плоскости приемного объектива линзой.

При внесении в рабочий промежуток исследуемого объекта так, чтобы его показатель преломления изменялся только в вертикальном направлении, лучи света, проходящие через различные горизонтальные срезы объекта, отклонятся им на разные углы в вертикальном направлении, и каждому срезу будет соответствовать свое изображение осветительной щели (одно из отклоненных изображений щели приведено над неотклоненным на рис. 10).

Вследствие смещения изображения осветительной щели по вертикали смещаются и участок наклонной нити, пересекающий изображение щели (см. рис. 10), и его изображение на фотоснимке в горизонтальной плоскости. В результате первоначально прямая по-

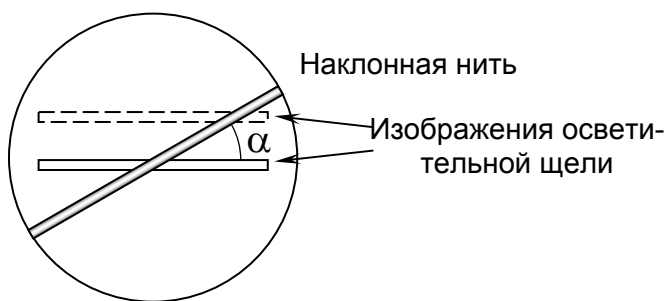


Рис. 10. Картина в задней фокальной плоскости приемного объектива.

лоска, отвечающая изображению освещенного участка нити, после внесения в рабочий промежуток исследуемого объекта будет искривлена.

Метод особенно целесообразно применять для исследования процессов в жидкостях, в которых обычно велики градиенты показателя преломления и, соответственно, сравнительно велики углы отклонения лучей.

4. Порядок проведения эксперимента. Юстировка теневого прибора Теплера

1. Установите шайбу с нитью в оправу, закрепленную на столике с микрометрическим поперечным перемещением, выбрав ориентацию нити соответственно решаемой задаче.
2. Установите требуемую по условиям задачи горизонтальную ориентацию осветительной щели на длиннофокусном коллиматоре; рекомендуемая ширина щели 0.1 мм.
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 (нити) 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 назад, чтобы перед ним можно было разместить еще один рейтер с держателем цилиндрической линзы, 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 видоискатель фотоаппарата. В эксперименте на место транспаранта устанавливается исследуемый объект.
7. Установите между микрометрическим столиком с визуализирующей диафрагмой и столиком с фотоаппаратом цилиндрическую линзу вертикально. Поперечным и продольным перемещением цилиндрической линзы добейтесь появления в середине поля зрения наиболее четкого изображения вертикальной темной полоски—тени от наклонной нити. По обе стороны от нее должны быть видны еще две тени—от реперных нитей, закрепленных на осветительной щели, тоже в виде вертикальных полосок. Они используются для определения увеличения.

Контрольные вопросы

1. Какова роль приемного объектива в теневом приборе Теплера?
2. Какую роль играет цилиндрическая линза в методе щели и наклонной нити?
3. Каково назначение проекционного объектива в использованном методе?
4. Какие плоскости рассмотренного теневого прибора являются сопряженными (отдельно в горизонтальном и вертикальном сечениях)?
5. Как формируется в изображении тень (построить геометрический ход лучей по правилам построения изображений, используя фокусы объективов и их узловые—центральные—точки отдельно для вертикальной и горизонтальной плоскостей)?
6. Как влияет ширина щели в методе щели и нити на качество измерений?
7. Как можно найти поправку в показания измерительного барабана, показывающего ширину щели коллиматора?

Литература

1. Васильев Л.А. Теневые методы. —М.: Наука, 1968. —400 с.: ил.
2. Зимин В.Д. Оптические методы 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.