

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

ПОЛУЧЕНИЕ И ОБМЕР ТЕНЕВОЙ КАРТИНЫ
ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ
Методические указания к лабораторной работе № 2

БАРНАУЛ–2010

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

Получение и обмер теневой картины теплового пограничного слоя: 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, 9 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 измерений по методу щели и наклонной нити.

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

Получение и обмер теневой картины теплового пограничного слоя

Цель работы: ознакомление с модификацией теневого метода Теплера–теневым методом наклонной нити (или щели) и цилиндрической линзы, приобретение навыков использования этой модификации теневого метода.

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; исследуемый объект–нагретая металлическая пластина.

Введение

Пограничным называется слой жидкости (газа) вблизи обтекаемой твердой поверхности (или в области взаимодействия струи жидкости с неподвижной жидкостью), в пределах которого проявляется основное действие сил вязкости и где формируются вихри.

В силу свойств прилипания жидких и газовых частиц к твердым поверхностям в пристенном пограничном слое скорость потока на обтекаемой стенке равна нулю (исключая случаи разреженных газов), а при удалении от нее по нормали приближается к скорости потенциального потока жидкости, обтекающего ту же поверхность.

Тепловой пограничный слой характеризуется резким изменением в поперечном направлении не только скорости, но и температуры–от температуры стенки до температуры обтекающей жидкости.

При большом по сравнению с толщиной пограничного слоя радиусе кривизны твердой поверхности можно в первом приближении считать, что температура изменяется вдоль нормали к поверхности и остается неизменной вдоль поверхности, то есть поле температуры является одномерным. Это допущение позволяет применить для исследования пограничного слоя теплеровский теневой метод щели и наклонной нити.

Метод щели и наклонной нити позволяет исследовать одномерные объекты, в которых плотность жидкости или газа изменяет-

ся вдоль одной декартовой координаты. Этим методом можно исследовать одномерные процессы диффузии и теплопередачи.

В настоящей работе регистрируется теневое изображение одномерного теплового пограничного слоя и производится обмер полученной теневой картины.

1. Метод наклонной нити (щели) и цилиндрической линзы

Установка для получения и регистрации теневой картины по методу наклонной нити (щели) и цилиндрической линзы описана в методических указаниях к выполнению лабораторной работы «Сборка и юстировка теневой установки по методу щели и наклонной нити». 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. В нашем случае изменение показателя преломления в исследуемом объекте происходит в вертикальном направлении, тогда осветительная щель ориентируется горизонтально. В качестве визуализирующей диафрагмы используется наклоненная по отношению к осветительной щели нить. 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. В построении изображения нити (в горизонтальном сечении изображения) принимают участие 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. 1а, 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, поэто-

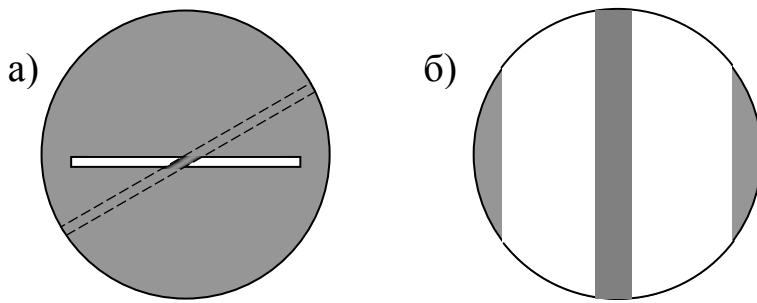


Рис. 1. Отображение фокальной плоскости приемного объектива линзой.

му эта светлая полоса с маленькой ромбовидной тенью размывается в вертикальном направлении в светлую полосу с темной вертикальной же полоской на ней (рис. 1б). Ширина темной полоски определяется шириной нити, шириной осветительной щели и углом наклона нити относительно щели.

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. 2).

Вследствие смещения изображения осветительной щели по вертикали смещаются и участок наклонной нити, пересекающий изображение щели (см. рис. 2), и его изображение на фотоснимке в горизонтальной плоскости. В результате первоначально прямая полоска, отвечающая изображению освещенного участка нити, после внесения в рабочий промежуток исследуемого объекта будет искривлена. Смещение l' изображения на фотоснимке в горизонтальном направлении определяется совокупностью соотношений

$$\operatorname{tg} \alpha = r'/l, \quad r' = f'_{\text{пр}} \operatorname{tg} \varepsilon; \quad \beta = l'/l,$$

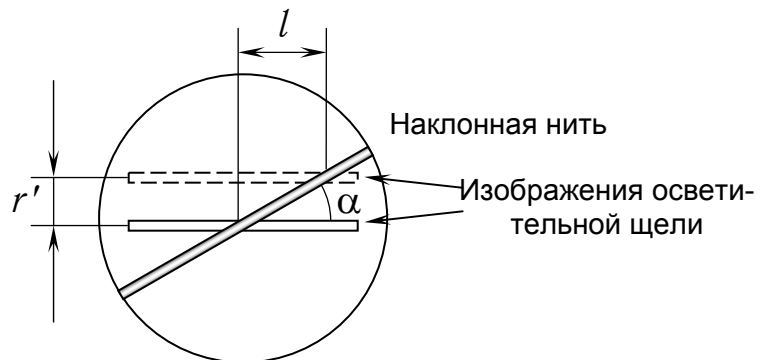


Рис. 2. Картина в задней фокальной плоскости приемного объектива.

где β —увеличение в горизонтальной плоскости на фотоснимке, даваемое оптической системой, включающей в себя цилиндрическую линзу, фотообъектив (и объектив фотоувеличителя, если анализируется фотоотпечаток). Первое из соотношений очевидно из рис. 2. Таким образом,

$$\varepsilon(x) \cong \operatorname{tg} \varepsilon(x) = r'/f'_{\text{пр}} = l' \operatorname{tg} \alpha / (\beta f'_{\text{пр}}). \quad (2)$$

Чувствительность прибора определяется как отношение приращения непосредственно измеряемого параметра к приращению параметра, обуславливающего изменение непосредственно измеряемого параметра. Для метода наклонной нити и цилиндрической линзы имеем

$$\mathcal{C} = \delta l' / \delta \varepsilon = \beta f'_{\text{пр}} / \operatorname{tg} \alpha. \quad (3)$$

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

2. Порядок проведения эксперимента

Получение теневой картины

1. Установите исследуемый объект—металлическую пластину—горизонтально поперек оптической оси скамьи на предметный столик между длиннофокусным коллиматором и приемным объективом в плоскость, сопряженную светочувствительному слою. С помощью установочных винтов столика добейтесь строгой горизонтальности (параллельности оптической оси) верхней плоскости пластины. Высоту столика установите такой, чтобы пластина входила в поле зрения целиком по высоте и чтобы верхняя плоскость пластины была видна (как линия) у нижнего края поля изображения, то есть чтобы оставалось место для теневой картины теплового пограничного слоя.
2. Проверьте юстировку теневого прибор (см. раб. №1): осветительная цель ориентируется горизонтально, рекомендуемая ширина щели 0.1 мм. В качестве визуализирующей диафрагмы используется наклонная нить.
3. Между микрометрическим столиком с визуализирующей диафрагмой и столиком с фотоаппаратом должна располагаться вертикально цилиндрическая линза. Поперечным и продольным перемещением цилиндрической линзы добейтесь появле-

ния 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 (L'/L).

4. Сфотографируйте наблюдаемую картину (вертикальную полосу и тени от реперных нитей по обе стороны); мощность осветительной лампочки при этом должна быть максимальной (задается реостатом блока ее питания).
5. Снимите исследуемый объект (металлическую пластину) с предметного столика, измерьте и запишите его ширину b , затем положите на включенную электроплитку, чтобы пластина достаточно прогрелась.
6. Установите исследуемый объект–нагретую металлическую пластину–горизонтально поперек оптической оси скамьи на предметный столик. Проверьте горизонтальность верхней плоскости пластины и при необходимости подрегулируйте с помощью установочных винтов столика.
7. Убедившись в искривлении наблюдаемой теневой картины, а также в том, что она попадает в кадр полностью (один край искривленной полосы упирается в нагретую поверхность, другой успевает выпрямиться в исходную полосу до выхода за пределы кадра), сфотографируйте наблюдаемую картину несколько раз, контролируя устойчивость картины; мощность осветительной лампочки при этом должна быть максимальной (задается реостатом блока ее питания).
8. Измерьте толщину пластины D . Запишите также комнатную температуру и атмосферное давление на момент фотографирования объекта.
9. Снимите со скамьи столик (держатель) с фотоаппаратом и поставьте горизонтальный микроскоп позади столика с визуализирующей диафрагмой. Перемещением микроскопа добейтесь появления в поле зрения микроскопа резкого изображения осветительной щели. Зафиксируйте микроскоп в таком положении и с помощью его механизма поперечного перемещения измерьте по его же поперечной шкале с нониусом расстояние между изображениями реперных нитей в фокальной плоскости приемного объектива L . Оно потребуется для определения масштаба изображения.

10. Измерьте также угол между осветительной щелью и наклонной нитью. Для этого развернете окуляр микроскопа так, чтобы шкала его окулярного микрометра была перпендикулярна наклонной нити. С помощью механизма поперечного перемещения столика с визуализирующей диафрагмой по его шкалам измерьте расстояние d —насколько необходимо переместить в поперечном направлении наклонную нить, чтобы ее изображение в окуляре пересекло $7 \div 8$ больших делений окулярного микрометра (расстояние a на рис. 3, *а*). Затем измерьте расстояние a , для чего развернув шкалу окулярного микрометра горизонтально (параллельно изображению осветительной щели), измерьте по шкалам столика с визуализирующей диафрагмой, насколько необходимо переместить наклонную нить, чтобы она пересекла те же $7 \div 8$ делений шкалы окулярного микрометра (рис. 3, *б*). При таком способе измерений не требуется определять цену деления окулярного микрометра. Измеренные катет и гипотенуза прямоугольного треугольника позволят рассчитать синус противолежащего катету a угол α (между осветительной щелью и наклонной нитью) и

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sin \alpha}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha}}.$$

Все измеренные и рассчитанные величины занесите в отчет.

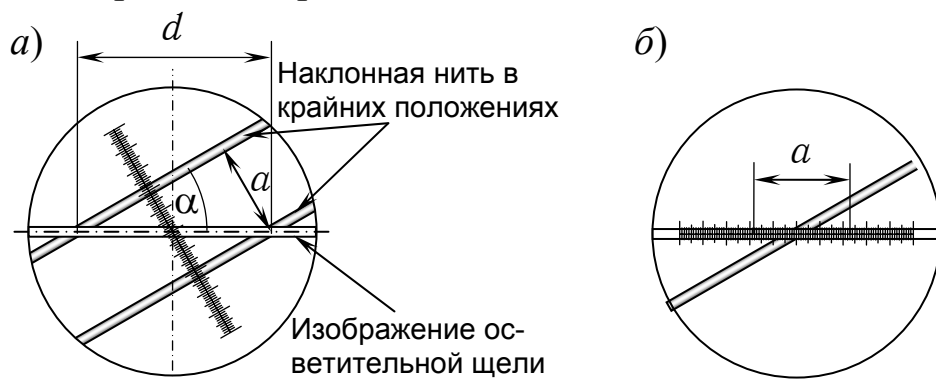


Рис. 3. Картина в задней фокальной плоскости приемного объектива.

11. После загрузки файлов изображений в компьютер выберите наилучшую пару теневых картин—с холодной пластиной и нагретой. На изображениях должны быть видны все три линии—теневая картина от наклонной нити (изогнутая линия в случае нагретой пластины), прямые тени от реперных нитей и тень от пластины, толщину которой нужно будет измерить для определения масштаба изображения исследуемого объекта.

Обмер теневой картины (выполняется на компьютере в графическом редакторе)

1. Измерьте расстояние L' между тенями от реперных нитей и рассчитайте горизонтальное увеличение теневой картины L'/L , даваемое проекционным объективом и цилиндрической линзой. По формуле (3) оцените чувствительность теплеровского теневого метода щели и наклонной нити; $f'_{\text{пр}} = 500$ мм.
2. Измерьте толщину изображения пластины D' и определите *вертикальный* масштаб изображения теневой картины пограничного слоя $M = D'/D$.
3. Ориентируясь на прямые тени от реперных нитей, проведите параллельно им прямую, проходящую вдоль тени от наклонной нити в той ее части, которая находится за пределами пограничного слоя и поэтому не искривлена. Продлите эту прямую до изображения нагретой поверхности. Таким способом получите отсчетную прямую.
4. Измерьте смещение $l'(z')$ изображения тени наклонной нити от отсчетной прямой как функцию высоты z' над изображением нагретой поверхности. Результаты измерений занесите в таблицу MS Excel.

Контрольные вопросы

1. Что такое пограничный слой?
2. Какие объекты позволяет исследовать метод щели и наклонной нити?
3. Что будет изменяться при увеличении угла наклона нити?
4. Почему наблюдаемая в теневой картине кривая спрямляется на удалении от пластины?
5. Оцените диапазон измерений углов отклонения в Вашей работе по ширине светлой полосы.

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.