

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

РАСЧЁТ ОДНОМЕРНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВОГО
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОБМЕРА
ТЕНЕВОЙ КАРТИНЫ ТЕПЛОВОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ

Методические указания к лабораторной работе № 3

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

Расчёт одномерного поля температуры теплового пограничного слоя по результатам обмера 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 и его использование для исследования теплового пограничного слоя, излагается порядок выполнения работы. Даются контрольные вопросы, приводится список литературы.

Предназначено для студентов специальности 010701.65 «физика» специализации «теплофизика». Ил. 1. Библиогр. 3.

Расчёт одномерного поля температуры теплового пограничного слоя по результатам обмера теневой картины теплового пограничного слоя

Цель работы: ознакомление с модификацией теневого метода Теплера–теневым методом наклонной нити (или щели) и цилиндрической линзы, экспериментальное ознакомление со структурой теплового пограничного слоя.

Оборудование: компьютер с графическими файлами, полученными при выполнении лабораторной работы № 2, и таблицей Excel, содержащей результаты обмера теневой картины.

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.

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, т. е. поле температуры является одномерным. Это допущение позволяет применить для исследования пограничного слоя теплеровский теневой метод щели и наклонной нити.

1. Связь показателя преломления с плотностью, температурой, давлением и составом газа

Оптические методы исследований широко применяются для изучения различных газодинамических и плазменных процессов в аэродинамических и ударных трубах, плазмотронах, в пламёнах и т.д. Оптические методы регистрации обладают существенными преимуществами перед контактными методами: они не вносят возмущений в поле течений, отличаются практической безынерционностью и высоким пространственным разрешением, позволяют проводить измерения в высокотемпературных, высокоскоростных потоках и получать информацию во всех точках регистрируемой области одновременно. Теневые и интерференционные методы по-

зволяют регистрировать изменение показателя преломления, а следовательно, в конечном счете, определять соответствующее распределение плотности среды: изменение плотности вещества всегда сопровождается изменением его показателя преломления.

Опытным данным в газах очень хорошо соответствует простое уравнение

$$\frac{n-1}{\rho} = \text{const}, \quad (1)$$

которое получило распространение под названием формулы Гладстона–Даля. Эту формулу легко получить из теоретически обоснованной формулы Лорентц–Лоренца

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\rho} = r$$

для значений показателя преломления, близких к единице. Постоянная r выражается через удельные рефракции r_k или молекулярные рефракции R_k входящих в данное вещество (смесь) компонентов с помощью соотношений

$$r = \sum_k a_k r_k = \frac{1}{\rho} \sum_k \nu_k R_k = \frac{\nu}{\rho} \sum_k C_k R_k$$

где ν и ρ – молярная концентрация (число молей в единице объёма) и плотность смеси; ν_k , $C_k = \nu_k/\nu$ и $a_k = \rho_k/\rho$ – соответственно молярная, относительная молярная и относительная массовая концентрация, а $\rho_k = M_k \nu_k$ и M_k – парциальная плотность и молярная масса k -го компонента. Соотношение (1) может быть записано также в виде

$$n-1 = \frac{3}{2} \sum_k \nu_k R_k = \frac{3}{2} \nu \sum_k C_k R_k \quad (2)$$

В справочниках обычно приводят значения показателя преломления, а не удельной или молекулярной рефракции, при нормальных условиях для желтой линии натрия. Молекулярная рефракция некоторого компонента смеси может быть выражена по формуле (2) через его показатель преломления, давление и температуру с использованием уравнения состояния идеального газа

$$p = \frac{1}{V} \frac{m}{M} RT = \nu RT. \quad (3)$$

Объединяя формулу (2), записанную для чистого компонента, с формулой (3), получим:

$$R_k = \frac{2}{3} \frac{n_k - 1}{v_k} = \frac{2}{3} \frac{n_k(p_0, T_0) - 1}{P_0} RT_0 \quad (4)$$

Используя формулы (4) и (3), перепишем формулу (2) для расчета показателя преломления смеси газов в виде

$$n - 1 = \frac{3}{2} \frac{p}{RT} \sum_k C_k R_k = \frac{p}{P_0} \frac{T_0}{T} \sum_k [n_k(p_0, T_0) - 1] \cdot C_k \quad (5)$$

Согласно экспериментальным данным и теории Лорентца, удельная рефракция, а соответственно и показатель преломления вещества, зависят от частоты или длины волны света λ . Широко используется дисперсионная формула Коши

$$n_k(\lambda) - 1 = A_k \left(1 + \frac{B_k}{\lambda^2} \right),$$

где A_k и B_k не зависят от λ и определяются эмпирически измерением $n_k(\lambda)$ для двух различных значений λ . Формула (5) принимает вид

$$n - 1 = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} \sum_k A_k \left(1 + \frac{B_k}{\lambda^2} \right) C_k \quad (6)$$

Значения $n_k(\lambda_D)$, A_k и B_k для некоторых газов приведены в таблице 1 Приложения. Для вычисления показателя преломления воздуха можно воспользоваться таблицей 2 Приложения, в которой приведен состав сухого воздуха, и таблицей 3 зависимости давления насыщенного пара от температуры. Атмосферное давление равно сумме парциального давления водяного пара и парциальных давлений компонентов сухого воздуха, а парциальное давление водяного пара вычисляется по известным относительной влажности и давлению насыщенного пара при данной температуре. Молярная концентрация водяного пара тогда может быть вычислена через парциальное давление по формуле (3).

2. Метод наклонной нити (щели) и цилиндрической линзы

Смещение l' изображения на фотоснимке в горизонтальном направлении (т. е. отклонение кривой от вертикальной кривой) определяется совокупностью соотношений (рис. 1)

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

где α —угол наклона нити, r' —смещение изображения щели в фокальной плоскости приемного объектива в вертикальном направлении, l —смещение точки пересечения нити с изображением щели в горизонтальном направлении, $f'_{\text{пр}}$ —фокусное расстояние приемного

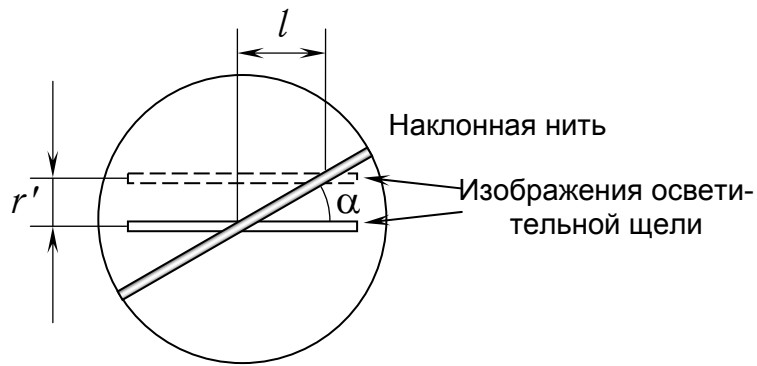


Рис. 1. Картина в задней фокальной плоскости приемного объектива.

объектива, ε —угол отклонения в данном сечении, β —увеличение в горизонтальной плоскости на фотоснимке, даваемое оптической системой, включающей в себя цилиндрическую линзу, фотообъектив (и объектив фотоувеличителя, если анализируется фотоотпечаток). Таким образом,

$$\varepsilon(x) \cong \operatorname{tg} \varepsilon(x) = r' / f'_{\text{пр}} = l' \operatorname{tg} \alpha / (\beta f'_{\text{пр}}). \quad (7)$$

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

$$\mathcal{C} = \delta l' / \delta \varepsilon = \beta f'_{\text{пр}} / \operatorname{tg} \alpha. \quad (8)$$

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

3. Обработка результатов обмера теневой картины (все вычисления выполняются в таблице Excel путем ввода соответствующих формул)

1. Учитывая, что $z = z' / M$, рассчитайте по формуле (7) угол отклонения лучей пограничным слоем $\varepsilon(z)$.
2. В приближении слабой рефракции по формуле

$$dn(z)/dz = \varepsilon(z)/b$$

(где учтено, что показатель преломления воздуха отличен от единицы лишь в четвертом знаке после запятой) рассчитайте градиент показателя преломления в пограничном слое $dn(z)/dz$ и, выполнив последовательно для каждого из интервалов Δz численное интегрирование (например, методом Симпсона), отклонение показателя преломления $\Delta n(z) = n(z) - n_0$ в по-

граничном слое от показателя преломления n_0 окружающего воздуха.

3. Рассчитайте индекс рефракции сухого воздуха $n_0(T_0, p_0) - 1$ при стандартных условиях, используя формулу (6) и таблицы 1, 2 Приложения; расчет выполняется с использованием электронной таблицы Microsoft Excel или Open Office Calc; возможно использование пакета Maple V Release 4.
4. Зная комнатную температуру и давление в день получения теневой картины, рассчитайте индекс рефракции воздуха $n_0(T, p) - 1$, считая относительную влажность равной 70% (используйте и таблицу 3).
5. По рассчитанным значениям $\Delta n(z)$ рассчитайте индекс рефракции нагретого воздуха как функцию высоты над поверхностью пластины $n(z) - 1$.
6. По формуле $(n(T, p) - 1) \cdot T = \text{const} = (n(T_1, p) - 1) \cdot T_1$, которая следует из формулы (6) с учетом постоянства давления в тепловом пограничном слое (здесь T_1 – абсолютная температура окружающего воздуха), рассчитайте распределение температуры $T(z)$ в пограничном слое и плотность теплового потока $q(z) = \lambda dT(z)/dz$, где λ – теплопроводность воздуха (теплофизические свойства сухого воздуха также даны в Приложении). Рассчитайте также коэффициент теплоотдачи α в законе Ньютона $q(z=0) = \alpha(T - T_1)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое тепловой пограничный слой?
2. Какой смысл имеет коэффициент теплоотдачи?
3. Каким образом из формулы Лорентц–Лоренца следует формула Гладстона–Даля?
4. Как учитывается влажность воздуха при расчете его показателя преломления?

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.

Приложение

Абсолютные показатели преломления некоторых газов и паров при нормальных условиях (температура 0°C, давление 101.325 кПа) для линии D натрия ($\lambda_D=0.5893$ мкм), а также константы A и B в формуле Коши.

Таблица 1

Газ или пар	$(n - 1) \cdot 10^6$	$A \cdot 10^6$	$B \cdot 10^4, \text{мкм}^2$
Азот	297	290,6	77
Аргон	284	279,2	56
Вода	252	243,5	87,2
Углекислота	450		
Кислород	272	266,3	50,7

Состав сухого воздуха

Таблица 2

Газ	Относительная молярная концентрация C_k
Азот	0,7809
Кислород	0,2095
Аргон	0,00933
Углекислота	$30 \cdot 10^{-5}$
Неон	$1,8 \cdot 10^{-5}$
Гелий, метан, криптон, водород и т. д.	менее 10^{-5}

Давление насыщенного пара

Таблица 3

Температура, °C	14	16	18	20	22	24	26	28
Давление, кПа	1,597	1,817	2,062	2,337	2,642	2,982	3,360	3,778

Теплофизические свойства сухого воздуха при $p=98.1$ кПа

Таблица 4

Температура, °C	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг·К)}$	$\kappa \cdot 10^2, \text{мВт/(м·К)}$	$\chi \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
10	1.207	1.00	2.44	19.4
20	1.166	1.00	2.51	20.7
30		1.00	2.58	22.0