Министерство образования и науки Российской Федерации

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева" в г. Белово

Кафедра технических наук

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ**

Методические указания к выполнению

лабораторной работы по дисциплине «Теплотехника»

для подготовки студентов направления 21.05.04

Составитель С.В. Белов

Утверждены на заседании кафедры

Протокол № 2 от 21.09.2017

Рекомендованы к печати

методическим советом филиала

КузГТУ в г. Белово

Протокол № 3 от 25.10.2107

Электронная копия находится в методическом кабинете филиала КузГТУ в г. Белово

**Белово 2017**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ**

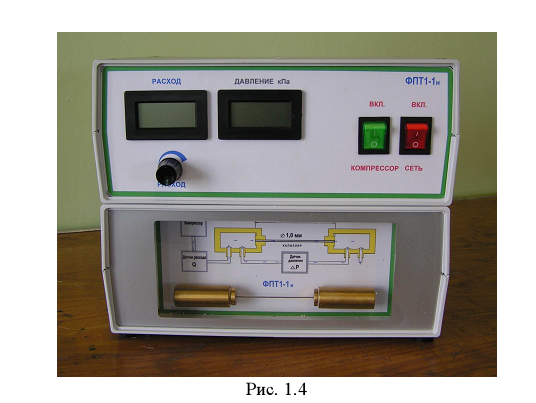
**1. Цель работы:** а) изучить внутреннее трение, как одно из явлений переноса в газах; б) с помощью установки ФПТ1-1н определить коэффициент вязкости, среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул азота (который составляет 78,1 % воздуха), коэффициент диффузии.

**2. Подготовка к работе:** прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – §§ 10.7 – 10.8, [2] – §§ 46, 48, [3] – §§ 128, 129, 132.

Для выполнения работы студент должен знать: а) формулу Пуазейля для определения коэффициента внутреннего трения; б) понятие коэффициентов диффузии и теплопроводности; в) физический смысл числа Рейнольдса и его расчёт; г) уметь пользоваться измерительными приборами.

**3. Выполнение работы**

**3.1. Описание лабораторной установки.**

****

*Рис. 1. Внешний вид и схема установки ФПТ1-1н*

Установка ФПТ1-1н представляет собой конструкцию настольного типа, состоящую из двух соединенных корпусов (рис.1):

1. блока рабочего элемента 1;
2. блока приборного 2.

На лицевой панели блока приборного находятся органы управления и регулирования: 8 – включатель сети, 9 – включатель компрессора, 5 – регулятор расхода, а также цифровые приборы для измерения давления – 7 и расхода – 6.

В состав блока рабочего элемента входит рабочий элемент – 4, представляющий собой металлический капилляр, закрепленный между камерами- 3. Через капилляр микрокомпрессор прокачивает воздух. Сглаживание пульсаций воздушного потока осуществляется ресивером, расположенном внутри блока. Расход воздуха измеряется датчиком расхода. Выходное напряжение датчика, пропорциональное расходу, измеряется специальным микропроцессорным цифровым прибором. Перепад давлений в капилляре измеряется специальным датчиком давления дифференциального типа.

**3.2. Описание метода измерения.**

Вязкость представляет собой пример так называемых явлений переноса. В упрощенной теории вязкости, которая, тем не менее, охватывает все существенные черты данного явления, используются понятия эффективного диаметра и средней длины свободного пробега молекул газа, которые кратко обсуждаются ниже.

Молекулы не все время движутся свободно, а время от времени сталкиваются с другими молекулами. В момент столкновения скорость молекулы испытывает резкое изменение как по величине, так и по направлению. В результате траектория молекулы получается не прямой, а ломаной линией с большим количеством звеньев. Для количественного описания явления Клаузиус ввел понятие средней длины свободного пробега, т.е. среднего расстояния, которое пролетает молекула между двумя последовательными столкновениями. Для оценки используется модель твердых шаров [3], с которыми отождествляются молекулы. Диаметр такого шара называется эффективным диаметром молекулы *d с*овпадает с минимальным расстоянием, на которое сближаются центры двух молекул. Для оценки предположим, что движется только одна молекула с постоянной скоростью – средней тепловой скоростью молекул

 (1)

Вообразим, что с подвижной молекулой жестко связана концентрическая с ней твердая сфера диаметра 2d, которую назовем сферой ограждения молекулы. Между двумя последовательными столкновениями подвижной молекулы ее сфера ограждения описывает цилиндр, длина которого и есть свободный пробег молекулы. Если центр другой молекулы лежит внутри или на боковой поверхности этого цилиндра, то она столкнется с нашей молекулой. В противном случае столкновения не произойдет. Пусть V – объем цилиндра, описываемого сферой ограждения в единицу времени, для которого имеем: V = πd2υ Среднее число z столкновений движущейся молекулы с остальными молекулами в единицу времени равно среднему числу последних в объеме V, т.е. z =Vn , где n – число молекул в единице объема или концентрация. Следовательно,

** (2)

Путь, пройденный молекулой за единицу времени, равен υ. Разделив его на среднее число столкновений z, получим среднюю длину свободного пробега молекулы:

**(3)

Строгий расчет с учетом Максвелловского распределения молекул по скоростям дает следующий результат

, (4)

. (5)

Наличие внутреннего трения в газах можно проиллюстрировать на следующем примере. Между двумя параллельными пластинками АВ и CD площади S (рис. 2) находится воздух или иной газ.

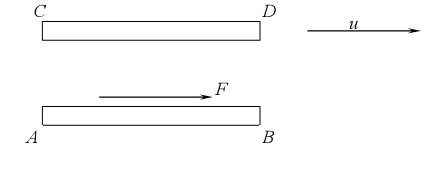


Рис. 2

При движении пластинки CD появляется сила, действующая на пластинку АВ и направленная в сторону движения. Эта сила и есть сила внутреннего трения. Впрочем, о внутреннем трении можно говорить лишь тогда, когда расстояние между пластинами АВ и CD очень велико по сравнению со средней длиной свободного пробега молекул газа. Тогда от наличия пластин можно отвлечься и говорить о силах, действующих внутри самого газа. Будем представлять себе газ неограниченным и движущимся стационарно плоско-параллельными слоями в горизонтальном направлении. Скорость этого макроскопического движения u меняется в направлении, перпендикулярном к слоям. Это направление примем за ось Х (рис.3).

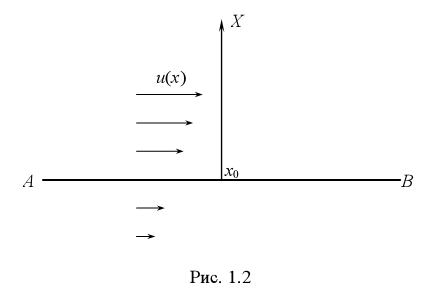


Рис. 3.

Таким образом, мы предполагаем, что u = u(x). Рассечем мысленно газ на две половины плоскостью, параллельной слоям и проходящей через некоторую точку x. Допустим для определенности, что скорость u(x) возрастает с возрастанием х. Тогда верхняя половина газа будет действовать на нижнюю с силой, направленной вправо, а нижняя на верхнюю – с силой, направленной влево. Это и есть силы внутреннего трения, и их величина определяется формулой Ньютона

**, (6)

где *η* — коэффициент вязкости.

С молекулярной точки зрения происхождение сил внутреннего трения объясняется следующим образом. Если бы газ покоился, то все направления скоростей его молекул были бы равновероятны. Средняя скорость и средний импульс каждой молекулы были бы равны нулю. При наличии упорядоченного движения газа средняя скорость молекулы отлична от нуля и равна u = u(x). С этой скоростью связан импульс Р = mu, которым обладает рассматриваемая молекула. Такой импульс условимся называть упорядоченным. Молекулы, лежащие над плоскостью АВ, обладают большим упорядоченным импульсом, чем молекулы, расположенные под ней. Переходя из верхнего полупространства в нижние, молекулы передают часть своего упорядоченного импульса молекулам, с которыми они сталкиваются в нижнем полупространстве. Это проявляется в том, что газ, расположенный ниже плоскости АВ, подвергается действию силы, направленной в сторону скорости u. Аналогично, более медленные молекулы, попадая из нижнего в верхнее полупространство, при столкновениях отнимают часть упорядоченного импульса у молекул, расположенных выше плоскости АВ. В результате газ в верхнем полупространстве испытывает тормозящую силу направленную против скорости u. Эти силы и являются силами внутреннего трения.

Количественное описание внутреннего трения с помощью рассмотрения потока импульса (который в нашем примере направлен сверху вниз) позволяет получить явное выражение для коэффициента внутреннего трения (или вязкости):

**.** (7)

В (1.7) использовано соотношение, связывающее плотность газа ρ с массой молекулы m и концентрацией молекул n: ρ = nm.

Для определения коэффициента вязкости воздух продувается через длинный тонкий канал (капилляр) с небольшой скоростью. При малых скоростях потока течение в канале является ламинарным, т. е. поток воздуха движется отдельными слоями, и его скорость в каждой точке направлена вдоль оси канала. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия r << l, где r – радиус; *l* – длина капилляра. В данной установке *l* = 0,1 м, r = 0,50 мм. Таким образом, условие малости радиуса капилляра по сравнению с его длиной выполнено. С другой стороны, r достаточно велик по сравнению с λ, чтобы был задействован механизм внутреннего трения. Так при условиях, близких к нормальным, для «молекул воздуха» имеем d = 3,7•10-10 м, и справедлива оценка λ= 6•10-8 м .

Для объемного расхода газа Q (т.е. объема газа, протекающего за единицу времени через поперечное сечение канала) справедлива формула Пуазейля:

. (8)

Это соотношение используется для экспериментального определения коэффициента вязкости газа. Измеряя объемный расход Q и разность давлений (p1 – p2 ) воздуха на концах капилляра длиной *l* и радиусом r, коэффициент вязкости можно рассчитать по формуле:

. (9)

**3.3. Порядок выполнения работы**

1. Включить установку тумблером «Сеть». При этом в модуле рабочего элемента загорается постоянная подсветка (зеленое свечение), указывающая на подачу питания.

2. Включить в приборном модуле переключатель «Компрессор». При этом отсек в модуле рабочего элемента подсвечивается мигающим красным светом, указывающим на то, что микрокомпрессор начал прокачку капилляра.

3. Замерить температуру Т и давление р в аудитории.

4. Плавно вращая регулятор расхода воздуха «Расход» в приборном модуле установить расход в соответствии с заданием по шкале расходометра на приборном блоке.

5. Замерить разность давлений (р1 – р2 ) с измерителя давления Значения «Расход Q» и (р1 – р2 ) занести в таблицу 1.

Таблица 1.

*Результаты измерений*

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Q м3/с | р1 – р2 Па | η  Па•с | υ  м/с | λ  м | z  с-1 | n  м-3 | d  м | D  м2/с |
| 1 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2 |  |  |  |
| 3 |  |  |  |
| 4 |  |  |  |
| 5 |  |  |  |

6. Повторить измерения по пунктам 4, 5 для пяти значений объемного расхода воздуха.

7. Выключить компрессор, а затем установку тумблером «Сеть».

3.4. Обработка результатов измерений

1. Для каждого измеренного режима определить коэффициент вязкости воздуха по формуле (9). Найти среднее значение коэффициента вязкости η.

2. Вычислить среднеарифметическую скорость υ движения молекул воздуха по формуле (1), учитывая, что молярная масса воздуха µ равна 29•10-3 кг/моль.

3. С полученным средним значением коэффициента вязкости воздуха по формуле

 (10)

рассчитать среднюю длину свободного пробега λ молекул. Концентрация n молекул воздуха может быть определена из формулы

, (11)

где используются измеренные значения температуры Т и давления р0 воздуха в аудитории.

4. Вычислить по формуле (5) эффективный диаметр d молекул и среднее число столкновений молекул z в единицу времени, учитывая соотношение

. (12)

5. Из формулы  найдите коэффициент диффузии. Результаты вычислений занесите в таблицу

4. Вопросы для самоподготовки.

1. При каких условиях возникают явления переноса? Сформулируйте основные законы их определяющие.
2. Как связаны между собой коэффициенты η, *D*?
3. Что понимают под средней длиной свободного пробега молекул?
4. Какая скорость входит в выражение для числа Рейнольдса? Почему? Что характеризует число Рейнольдса?
5. Как изменяется вязкость газов и жидкости с ростом температуры?
6. Одинаков ли механизм вязкости жидкости и газов?
7. Запишите уравнения диффузии, теплопроводности, внутреннего трения.
8. Какова причина возникновения силы внутреннего трения?
9. От каких параметров зависит коэффициент внутреннего трения?
10. Какое течение жидкости называется ламинарным? Турбулентным?
11. Каков критерий определения характера течения жидкости?
12. Как определить число Рейнольдса?

5. Список рекомендуемой литературы

1. Детлаф, А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учебное пособие для втузов/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 6-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 720 с
2. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. - 18-е изд., стер. – М.: ИЦ Академия, 2010. – 560 с.

3. Савельев, И.В. Курс общей физики. В 3 т. Том 1. Механика. Молекулярная физика [Электронный ресурс] : учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург : Лань, 2016. — 436 с. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/71760. — Загл. с экрана.

Составитель

Белов Сергей Викторович

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА КАПИЛЛЯРНЫМ МЕТОДОМ**

Методические указания к выполнению

лабораторной работы по дисциплине «Теплотехника»

для подготовки студентов направления 21.05.04