

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Н.А. Гладков, Л.Ю. Глазкова.

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В ГАЗАХ

Методические указания к лабораторной работе МТ-1 по курсу общей физики.
Москва, 2005

В методических указаниях содержатся краткие теоретические сведения по теме «Явления переноса», объясняющие эти процессы с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Представлены основные соотношения, аналитически описывающие явление внутреннего трения. В экспериментальной части изучается течение газа в узкой трубке для определения коэффициента вязкости. Описаны установка, порядок проведения эксперимента и процесс обработки экспериментальных данных.

Для студентов первого курса, изучающих тему «Молекулярная физика и термодинамика».

Цель работы — изучение вязкости (внутреннего трения) воздуха как одного из явлений переноса в газах.

Теоретическая часть.

Явления переноса — это необратимые процессы, возникающие при нарушении равновесия в физической системе и стремящиеся привести систему в равновесное состояние. Каждое из явлений переноса связано с неоднородностями плотности, температуры или скорости упорядоченного перемещения отдельных слоев вещества. Выравнивание неоднородностей приводит к возникновению явлений переноса. Явления переноса в газах и жидкостях состоят в том, что в этих веществах возникает упорядоченный направленный перенос массы (диффузия), импульса (внутреннее трение) и внутренней энергии (теплопроводность). В химически однородном газе диффузия есть перенос массы газа из области с большей плотностью в область с меньшей плотностью. Теплопроводность осуществляется в макроскопически неподвижной неравномерно нагретой среде и представляет собой перенос энергии в форме теплоты. Внутренним трением, или вязкостью, называется появление сил трения между слоями жидкости или газа, движущимися параллельно друг другу с разными скоростями, что приводит к переносу импульсов упорядоченного движения молекул.

Все эти явления молекулярно-кинетическая теория объясняет хаотическим тепловым движением частиц системы и неодинаковыми значениями какой-либо величины в разных частях системы (пространственная неоднородность ее состава вызывает диффузию, разность температур - теплопроводность, разность скоростей ее слоев — вязкость).

Вязкость газов возникает в результате суперпозиции упорядоченного направленного движения параллельных слоев газа, перемещающихся с различными скоростями, и хаотического движения молекул. В результате хаотического теплового движения молекулы переходят из слоя в слой, частично теряя или увеличивая свой «упорядоченный» импульс. Это означает, что на более медленно движущийся слой действует ускоряющая сила, а на быстро движущийся слой - тормозящая сила.

В случае медленного движения газа в прямой цилиндрической трубке малого диаметра (капилляре) течение можно считать ламинарным, т. е. упорядоченным. Газ перемещается слоями с капилляром цилиндрическими слоями.

Согласно основному закону вязкого течения, установленному И. Ньютоном в 1687 году, между слоями возникает сила внутреннего трения, которая в случае ламинарного течения газа по капилляру имеет вид

$$F = -\eta \frac{dV}{dr} S, \quad (1.1)$$

где F — тангенциальная (касательная) сила внутреннего трения, действующая на элемент слоя площадью S ; η - коэффициент динамической вязкости; $\frac{dV}{dr}$ - градиент скорости течения (быст-

рота изменения скорости от слоя к слою). Знак «-» в формуле (1.1) означает, что скорость газа при удалении от оси трубки убывает.

Для идеального газа

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \lambda u, \quad (1.2)$$

где ρ - плотность газа; λ - средняя длина свободного пробега молекул, т. е. среднее расстояние, которое пробегают молекулы между двумя последовательными столкновениями. Ее рассчиты-

вают по формуле $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_{\text{эф}}^2 n}$, где n — концентрация молекул газа; $d_{\text{эф}}$ - эффективный диа-

метр молекул, т. е. минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновениях центры молекул. При небольших изменениях температуры в первом приближении

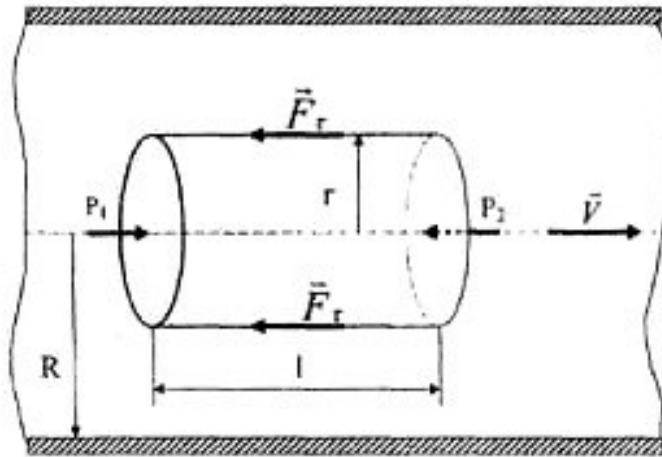


Рис. 1. Течение газа через капилляр

эффективный диаметр можно считать величиной постоянной для данного газа. Также в форму-

ле (1.2) u — средняя скорость теплового движения молекул, $u = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$, где μ - молярная масса

газа; R — универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К).

Мысленно выделим в капилляре воображаемый цилиндрический объем газа радиусом r и длиной l , как показано на рис. 1. Обозначим давления на его торцах как P_1 и P_2 . При установившемся течении сила давления на торцы цилиндра

$$F_T = (P_1 - P_2) \pi r^2$$

уравновесится силой внутреннего трения F , которая действует на боковую поверхность цилиндра со стороны внешних слоев газа:

$$F - F_T = 0. \quad (1.3)$$

Силу внутреннего трения определяют по формуле Ньютона (1.1). Учитывая, что $S = 2\pi r l$ и скорость $V(r)$ уменьшается при удалении от оси трубы, т. е. $\frac{dV}{dr} < 0$, можно записать

$$F = -\eta \frac{dV}{dr} 2\pi r l. \quad (1.4)$$

В этом случае условие стационарности (1.3) запишется в виде

$$(P_1 - P_2) \pi r^2 + \eta \frac{dV}{dr} 2\pi r l = 0. \quad (1.5)$$

Интегрируя это равенство, получаем

$$V = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C$$

где C - постоянная интегрирования, которая определяется граничным условием на внутренней поверхности капилляра.

При $r = R$ скорость газа должна обратиться в нуль, поскольку сила внутреннего трения о стенку капилляра тормозит смежный с ней слой газа.

Тогда

$$V = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (1.6)$$

Подсчитаем объемный расход газа Q , т. е. объем, который протекает за единицу времени через поперечное сечение трубы. Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и внешним радиусом $r + dr$ каждую секунду протекает объем газа $dQ = 2\pi r dr V(r)$.

Тогда

$$Q = \int_0^R 2\pi r V(r) dr = \pi \frac{P_1 - P_2}{2\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr$$

или

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) называется *формулой Пуазейля* и используется для экспериментального определения коэффициента вязкости газа.

Формула Пуазейля была получена в предположении ламинарного течения газа или жидкости. Однако с увеличением скорости потока движение становится турбулентным и слои смешиваются.

При турбулентном режиме течения возникают микрообъемы газа, каждый из которых проходит некоторое расстояние как целое в любом направлении с определенной скоростью. При турбулентном движении скорость в каждой точке меняет свое значение и направление, сохраняется только ее среднее значение. Характер движения жидкости или газа в трубе определяется так называемым безразмерным числом Рейнольдса, являющимся основным критерием, определяющим режим течения газа:

$$Re = \frac{\langle V \rangle R \rho}{\eta} \quad (1.8)$$

где $\langle V \rangle$ — средняя скорость потока; ρ — плотность жидкости газа. Переход ламинарного режима в турбулентный происходит при числе Рейнольдса, называемом критическим.

В гладких цилиндрических каналах переход от ламинарного течения к турбулентному происходит при $Re \approx 1000$. Поэтому в случае использования формулы Пуазейля необходимо обеспечить выполнение условия $Re < 1000$. Кроме того, эксперимент необходимо проводить таким образом, чтобы сжимаемостью газа можно было пренебречь. Это возможно тогда, когда перепад давлений в капилляре значительно меньше самого давления, т. е. $\Delta P \ll P$. В используемой установке давление газа несколько больше атмосферного (10^3 см вод. ст. или $9,8 \cdot 10^4$ Па), а перепад давлений составляет от 10 см вод. ст. (это приблизительно 1 % от атмосферного).

Формула (1.7) справедлива для участка трубы, в котором установилось постоянное течение с квадратичным законом распределения скоростей (1.6) по сечению трубы. Такое течение устанавливается на некотором расстоянии от входа в капилляр, поэтому для достижения достаточной точности эксперимента необходимо выполнение условия $R \ll L$, где R — радиус; L — длина капилляра.

Для определения коэффициента вязкости воздуха предназначена экспериментальная установка ФПГ 1-1, общий вид которой изображен на рис. 2. Воздух в капилляр б нагнетается микрокомпрессором, размещенным в блоке приборов 3. Объемный расход воздуха измеряют реометром 5, название которого происходит от греческих слов *реос* (течение) и *метрео* (измерять), а нужное значение расхода устанавливают регулятором «Воздух», который находится на

передней панели блока приборов. Для измерения разности давлений воздуха на концах капилляра предназначен U-образный водяной манометр 2. Геометрические размеры капилляра: радиус $R = 0,5$ мм, длина $L = 10$ см.

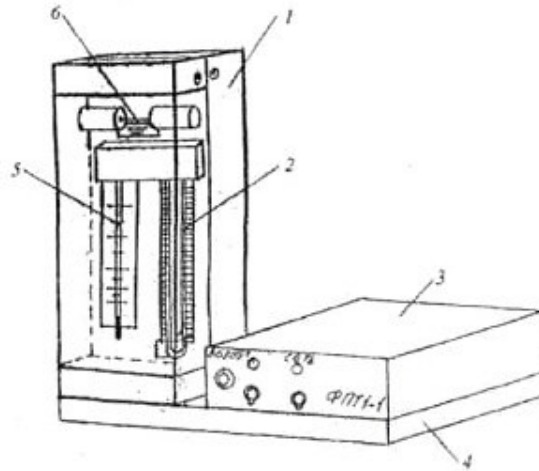


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки ФПТ 1-1:
1 - блок рабочего элемента; 2 - манометр; 3 - блок приборов;
4 - стойка; 5 - реометр; 6 — капилляр.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером «Сеть».
2. С помощью регулятора «Воздух» установить по показаниям реометра выбранное значение объемного расхода воздуха $Q = 0,5$ м³/с.
3. Измерить разность давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ в коленах манометра, учитывая, что 1 см вод. ст. = $0,98 \cdot 10^2$ Па. Значения Q и ΔP занести в таблицу.

Номер измерения	Q , м ³ /с	ΔP , Па	η , кг/(м·с)

4. Повторить 5 раз измерения по пп. 2-3, предварительно уменьшая расход воздуха, а затем вновь его восстанавливая до значения $Q = 0,5$ м³/с.
5. Установить регулятор расхода воздуха на минимум, после чего выключить установку тумблером «Сеть».

Обработка результатов измерений

1. Для каждого опыта определить по формуле Пуазейля коэффициент вязкости воздуха:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8QL}$$

2. Найти среднее значение коэффициента вязкости

$$\langle \eta \rangle = \sum_{i=1}^5 \eta_i$$

3. По формуле $u = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ вычислить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха, учитывая, что молярная масса воздуха $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а универсальная постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

4. По формуле $\lambda = \frac{3 \langle \eta \rangle}{\rho u}$ вычислить среднюю длину свободного пробега молекул. Плотность воздуха при температуре $t = 20$ °С равна $\rho = 1,2$ кг/м³.

5. Оценить погрешность результатов измерения, используя работу [1]. Результаты эксперимента

представить в виде $\eta = \langle \eta \rangle \pm \sigma$, где $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\langle \eta \rangle - \eta)^2}{n-1}}$.

Контрольные вопросы.

1. Какие явления переноса Вы знаете? Как объясняет эти явления молекулярно-кинетическая теория?
2. Объясните явление внутреннего трения в идеальном газе с точки зрения молекулярно-кинетической теории.
3. Напишите и объясните формулу Ньютона для внутреннего трения.
4. Какой физический смысл имеет коэффициент вязкости? В каких единицах СИ измеряется эта величина?
5. Напишите формулу для коэффициента вязкости идеального газа.
6. Какая величина называется средней скоростью теплового движения молекул идеального газа? От чего зависит средняя скорость теплового движения молекул?
7. Какая величина называется средней длиной свободного пробега молекулы? От каких физических величин она зависит?
8. В чем заключается капиллярный метод определения коэффициента вязкости газов? Выведите формулу Пуазейля. При каких условиях ее применяют?
9. Как изменяется скорость движения газа по радиусу канала при ламинарном режиме течения?
10. Как оценить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы газа, используя явление внутреннего трения в газах?
11. Почему при строительстве магистральных газопроводов используют трубы большого диаметра, а не увеличивают давление газа при его транспортировании?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельева А.И., Фетисов И.Н. Обработка результатов измерений при проведении физических экспериментов: Метод, указания. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
2. Матвеев А.М. Молекулярная физика. М.: Высш. шк., 1981.
3. Савельев И.В. Курс общей физики: В 3 т. Т. 1: Механика. М.: Наука, 1998.
4. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1990.