

Министерство общего и профессионального  
образования Российской Федерации

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА И РАСЧЕТ  
СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО  
ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Методические рекомендации

Иркутск 2004

Печатается по решению научно- методического совета  
Иркутского государственного университета

Кратко приведены некоторые положения и формулы, связанные с движением жидкостей и газов. Изложены причины внутреннего трения в этих средах. Рассмотрен один из методов экспериментального определения коэффициента внутреннего трения воздуха.

Предназначено для студентов 1 и 2 курсов естественных факультетов.

Библиогр. 5 назв. Ил.11. Табл. 3.

Составители: к.ф.-м.н., доцент Глазунов О.О.  
к.ф.-м.н., доцент Красов В.И.  
ст. преподаватель Сверчинская С.А.  
(кафедра общей и космической физики)

Рецензент доц. Акатова Л.А.

**Цель работы:** знакомство с некоторыми представлениями и формулами молекулярной физики газов, а также с одним из методов экспериментального определения коэффициента вязкости воздуха.

## ВВЕДЕНИЕ

Основное положение молекулярно-кинетической теории сводится к тому, что во всяком веществе молекулы движутся хаотически, скорости которых определяют тепловое состояние тела. При комнатной температуре среднеквадратичная скорость молекул воздуха близка к 500 м/с. Возникает вопрос: почему запахи в воздухе распространяются сравнительно медленно? Это объясняется тем, что вследствие столкновений друг с другом молекулы перемещаются не всё время прямолинейно; их путь является зигзагообразным, состоящим из отдельных прямолинейных отрезков пути (между соударениями). **Средней длиной свободного пробега ( $l$ )** молекулы называется среднее расстояние, проходимое молекулой между последовательными столкновениями её с другими молекулами. Среднее же расстояние, на которое сближаются центры 2х молекул при столкновении, называется **эффективным диаметром молекулы ( $d$ )**. В жидкостях молекулы также совершают тепловое движение, только длина свободного пробега здесь меньше, чем в газах

Представим себе, что газ протекает по трубе цилиндрического сечения. Скорости отдельных слоев в потоке различны. Естественно, что с наибольшей скоростью движение совершается в средней части сечения (рис.1), а по мере приближения к стенкам скорость убывает. У самой стенки имеется слой газа с нулевой скоростью (газ "прилипает" к стенке).

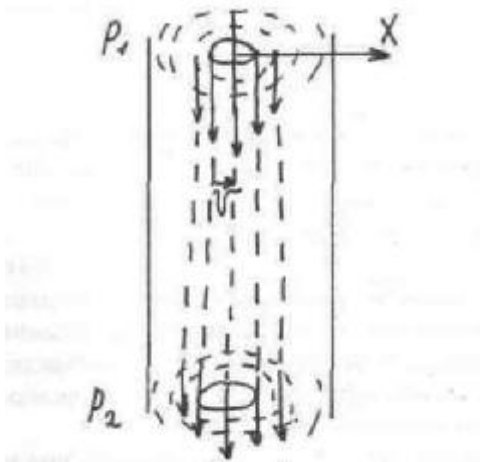


Рис. 1

Весь поток газа можно мысленно разбить на слои цилиндрической формы, движущиеся с различными скоростями. В силу этого на границе слоев возникнут силы внутреннего трения, направленные касательно к границе между слоями и стремящиеся уравнять скорости движения разных слоев. Все молекулы газа, помимо направленного движения, участвуют в тепловом движении, поэтому происходит непрерывный переход молекул из более быстрого слоя в более медленный слой и обратно. В результате столкновения молекулы обмениваются импульсом, т.е. между слоями возникают силы внутреннего трения. Эти взаимодействия замедляют движение быстрого слоя и ускоряют движение медленного, что приводит со временем к выравниванию импульсов.

Сила внутреннего трения между слоями равна:

$$F = h(Dv/Dx)S \quad (1)$$

где  $S$  - площади соприкосновения слоев,  $v$  - скорость направленного движения газа,  $(Dv/Dx)$  - градиент скорости,  $h$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от рода газа (жидкости), от температуры среды и называемый коэффициентом динамической вязкости или просто вязкостью.

$F$  - сила внутреннего трения направлена по касательной к поверхности соприкосновения слоев. Полагая  $S = 1\text{ м}^2$ ,  $(Dv/Dx) = 1 \text{ м/с*м}$ , получим  $F=h$ , т.е. **коэффициент вязкости численно равен силе внутреннего трения,**

*действующей на единичные площади соприкосновения параллельно движущихся слоев газа (жидкости) при единичном градиенте скорости между ними.* Единицей вязкости в СИ является Па\*с.

При *ламинарном* течении соседние слои газа (жидкости) текут хотя и с разными скоростями, но параллельно друг другу, не перемешиваясь. При увеличении скорости или поперечных размеров потока характер течения существенным образом изменяется. Возникает энергичное перемешивание жидкости. Такое течение называется *турбулентным*. Турбулентное течение, в отличие от ламинарного, является нестационарным. Английский ученый Рейнольдс установил, что характер течения зависит от значения безразмерной величины, которую называют *числом Рейнольдса*  $Re$ :

$$Re = rvD/h \quad (2),$$

где  $r$  - плотность жидкости (или газа),  $v$  -средняя (по сечению трубы) скорость потока,  $D$  -характерный для поперечного сечения размер, например, диаметр при круглом сечении и т.д. При малых значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарное течение. При значении числа  $Re \geq 1000$  течение приобретает турбулентный характер.

Для поддержания движения газа (жидкости) по трубе необходимо создать разность давлений на концах трубы. При ламинарном течении по трубе справедлива формула Пуазейля:

$$V = pr^4tDP/8Lh \quad (3),$$

где  $V$  - объём протёкшего по трубе газа пропорционален четвертой степени радиуса трубки  $r$ , времени протекания  $t$ , разности давлений на концах трубки  $DP$  и обратно пропорционален длине трубки  $L$  и коэффициенту вязкости  $h$ . Таким образом, газ (или жидкость) тем быстрее протекает по трубе, чем меньше коэффициент вязкости и чем больше разность давлений. Из формулы Пуазейля следует, что

$$h = pr^4 t DP / 8LV \quad (4).$$

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Приборы и принадлежности: установка, стеклянные стаканчики, секундомер. Установка для определения вязкости воздуха состоит из сосуда 1 с краном 2 и пробки 3 (рис.2). В пробку вставлен капилляр 4, через который и будет протекать воздух. Пространство над водой, наливаемой в сосуд, соединяется трубкой 5 с манометром 6, измеряющим разность давлений воздуха в комнате и в сосуде. При закрытом кране давление воздуха в сосуде и в комнате одно и то же. Уровни жидкости в левом и правом коленах манометра одинаковы. Если открыть кран, то вода из сосуда начнет быстро выливаться, и давление в сосуде будет падать. Вследствие этого скорость истечения воды со временем уменьшается. Когда вода из крана начинает вытекать каплями,

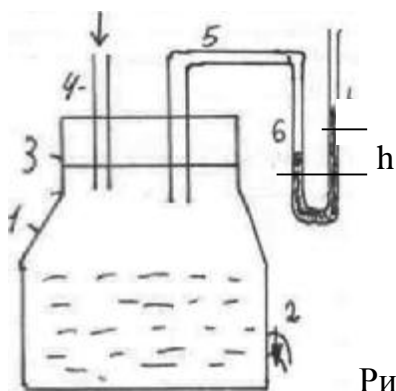


Рис.2.

устанавливается равновесие: какой объем воздуха входит в сосуд через капилляр за определенное время, такой же объем воды вытечет через кран. Таким образом, мы узнаем объем воздуха, протекшего через капилляр за определенное время.

## ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Подставить под кран какую-нибудь ёмкость и открыть кран. Дождаться, пока

- вода станет выливаться каплями,
2. Подставить под кран стаканчик, проградуированный в единицах объема, и одновременно пустить секундомер.
  3. Сразу после этого заметить показание манометра, измерив разность уровней жидкости в левом и правом коленах  $h_1$ . Результат записать в таблицу.
  4. Дождаться пока в стаканчик наберется определенный объем воды (например,  $50 \text{ см}^3$ ). Заметить новое показание манометра  $h_2$ .
  5. Закрыть кран, одновременно остановив секундомер. Записать время истечения воды  $t$ .
  6. Определить среднее показание манометра, во время опыта по формуле  $h=(h_1+h_2)/2$  и рассчитать разность давления  $DP=rgh$ , где  $r$  - плотность воды при температуре опыта,  $g$  - ускорение свободного падения, равное  $9,8 \text{ м/с}^2$ .
  7. По формуле (4) вычислить коэффициент вязкости воздуха  $h$ . Результаты измерений записать в таблицу.
  8. Повторить опыт, начиная с пункта 2. Всего сделать не менее 8 определений коэффициента, вязкости воздуха. Подсчитать среднее значение  $h$  и вычислить погрешность результата, пользуясь статистическим методом обработки наблюдений.
  9. Ознакомившись с приложением, вычислить среднюю длину свободного пробега  $l$  и эффективный диаметр молекул воздуха  $d$  (см. формулы (8) и (9) приложения, соответственно).

$V, \text{ м}^3$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$DP, \text{ Па}$	$h, \text{ Па}\cdot\text{с}$

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Записать формулу силы трения между слоями газа (жидкости).

2. Дать определение коэффициента вязкости, единицы его измерения.
3. Какое движение газа (жидкости) называется ламинарным, турбулентным?
4. Почему вода сначала вливается струей, а затем каплями?
5. Вследствие чего возникает трение между слоями газа?
6. Почему разность давлений равна  $\rho gh$ ?
7. Какой еще можно придумать метод измерения коэффициента вязкости?
8. Написать основное уравнение кинетической теории газов.
9. Получить из уравнения Менделеева-Клапейрона выражение (6).
10. Что называется киломолем?
11. Что называется средней длиной свободного пробега и эффективным диаметром молекул газа?
12. Как зависит  $l$  от  $T$ ?
13. Зависит ли  $l$  от давления при постоянной температуре?
14. Имеется сосуд с газом. Если сосуд нагревать, будет ли изменяться  $l$  в сосуде: а) сосуд закрытый? б) в сосуде имеется отверстие?



## ПРИЛОЖЕНИЕ

Знание коэффициента вязкости воздуха  $h$  дает возможность определить длину среднюю свободного пробега  $l$ . Из кинетической теории газа известно, что коэффициент вязкости газа равен:

$$h = rl\nu/3, \quad (5),$$

где  $r$  - плотность газа,  $l$  - средняя длина свободного пробега молекул,  $\nu$  - средняя арифметическая скорость движения молекул. Плотность газа  $r$  определяется следующим выражением, вытекающим из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$r = Pm/RT. \quad (6)$$

Здесь  $m$  - молекулярная масса газа,  $P$  - атмосферное давление, при котором проводится опыт,  $T$  - абсолютная температура газа в комнате,  $R$ - универсальная газовая постоянная. Средняя арифметическая скорость молекул воздуха может быть рассчитана по формуле:

$$\nu = \sqrt{8RT / pm}. \quad (7)$$

Подставив уравнения (6) и (7) в уравнение (5), получим для средней длины свободного пробега молекул воздуха следующее выражение:

$$l = \frac{3h}{P} \sqrt{\frac{pRT}{8m}}. \quad (8)$$

$R = 8,31 \cdot 10^3$  Дж/кмоль К, для воздуха  $m = 28,96$  кг/кмоль.

Между длиной свободного пробега и эффективным диаметром молекул воздуха существует соотношение, позволяющее определить эффективный диаметр молекул воздуха:

$$d^2 = 0.7kT/Pp l , \quad (9),$$

где  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 2002 (и более ранние издания). – 542 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. – М.: Наука, 1998.- Кн. 3 . – 208 с.
3. Грабовский Р.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1980. – 607 с.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика: – М.: Высшая школа, 1987. – 360 с.
5. Сивухин Л.В. Общий курс физики: Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. – т.2 – 591 с.

*Глазунов Олег Олегович,  
Красов Виктор Иванович,  
Сверчинская Светлана Анатольевна*

Определение коэффициента вязкости воздуха и расчет средней длины  
свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха

Методические рекомендации

Подписано в печать . Формат 60X90 1/16.

Бумага писчая. Печать офсетная. Гарнитура Times.

Усл.печ.л. .Уч.-изд. л. . Тираж 150 экз. План 2004г. Поз.

Редакционно- издательский отдел  
Иркутского государственного университета  
664003, Иркутск, б. Гагарина,36