

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

НОВЫЕ РАБОТЫ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

В нашей лаборатории поставлены две новые учебные работы, которые мы считаем целесообразным вынести на обсуждение, как более современные по сравнению с рекомендуемыми в программе для вузов.

Первая работа называется «Определение коэффициента диффузии и длины свободного пробега молекул водяного пара в воздухе». Схема установки приведена на рис. 1. Под стеклянным колоколом воздушного насоса помещена стойка с проволокой, на которой подвешивается водяная капля. Выделяющиеся пары поглощаются в кювете 2 с концентрированной серной кислотой. Кювета и стойка с каплей покрываются колоколом, и с помощью отсчетного микроскопа измеряется диаметр капли через последовательные промежутки времени. Полученные значения наносятся на график зависимости R^2 от t , и по наклону усредненной прямой рассчитывается коэффициент диффузии:

$$D = \frac{\rho}{2c_0} \frac{-\Delta(R^2)}{\Delta t}. \quad (1)$$

Здесь ρ — плотность жидкости, а c_0 — равновесная концентрация водяных паров в воздухе, выраженная в тех же единицах ($г/см^3$). Величина c_0 берется по таблицам концентраций насыщенных паров при температуре опыта. В учебной лаборатории нет смысла учитывать охлаждение испаряющейся капли и подвешивать ее на специальной термопаре.

Продажный ртутный вакуумметр с установки снят и ввинчен технический стрелочный вакуумметр на $0 \div 760$ мм. После испарения первой капли колокол снимают, подвешивают вторую, закрывают ее колоколом и быстро откачивают воздух до давления порядка $1/2$ ат. В этих условиях вновь измеряют уменьшение радиуса со временем и вычисляют D по формуле (1). Измерения достаточно провести при трех давлениях: $p_0 \approx 1$, $1/2$ и $1/4$ ат в пределах точности стрелочного вакуумметра. Стремиться к более низким давлениям нецелесообразно, так как благодаря большой скорости испарения становится трудным производить визуальные измерения. Кроме того, когда p_0 станет равным равновесной упругости насыщенного пара при температуре окружающей среды, капля закипит.

Измерения при трех давлениях позволяют проверить вытекающую из кинетической теории газов обратную пропорциональность коэффициента диффузии давлению, т. е. постоянство произведения

$$Dp_0 = \text{const.}$$

Кроме того, измерив D и зная среднюю скорость молекул $c = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$, можно

из теоретической зависимости $D = 1/3 lc$ определить среднюю длину свободного пробега молекул пара в воздухе при различных давлениях.

Работа выполняется примерно за один час. Ввиду трудности притирки колокола после помещения под него каждой новой капли мы предпочли для предотвращения прососов обмазывать нижнюю часть колокола пластином.

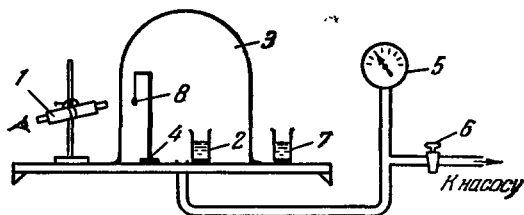


Рис. 1. Схема установки для измерения коэффициента диффузии водяных паров в воздухе.

1 — Отсчетный микроскоп; 2 — кювета с концентрированной H_2SO_4 ; 3 — стеклянный колокол; 4 — стойка с подвесом для капли; 5 — стрелочный вакуумметр; 6 — кран к насосу; 7 — стакан с водой и стеклянной палочкой; 8 — подвешенная капля.

Вторая работа называется «Изучение зависимости вязкости газа (воздуха) от давления и определение длины свободного пробега молекул». Основная часть установки показана на рис. 2. На латунной стойке укреплен ряд параллельных латунных дисков диаметром ~ 50 мм, расположенных горизонтально, с одинаковыми зазорами $\sim 2,5$ мм. Через прорези в дисках по центру располагается стержень с укрепленными на нем параллельными дисками толщиной $\sim 0,2$ мм каждый. Эта вертушка подвешена на упругой нити и с помощью винта устанавливается так, чтобы подвижные пластинки располагались ровно посередине между неподвижными. На нижнем конце стержня прикреплен груз и стальная стрелка-указатель угла поворота вертушки.

Стойка с вертушкой через шлиф вводится и укрепляется внутри цилиндрической вакуумной колбы. Колба подключена к системе из ротационного форвакуумного насоса и металлического паромасляного насоса высокого вакуума типа ММ-40. Для измерения вакуума к колбе припаяна лампа ЛТ-2 термометрического вакуумметра ВТ-2, имеющего два диапазона: $1-0,1$ мм и $10^{-1}-10^{-3}$ мм рт. ст.

С помощью магнита извне вертушка закручивается на угол $\sim 45^\circ$ и начинает совершать крутильные колебания с периодом порядка $\tau_0 = 4-5$ сек. Благодаря

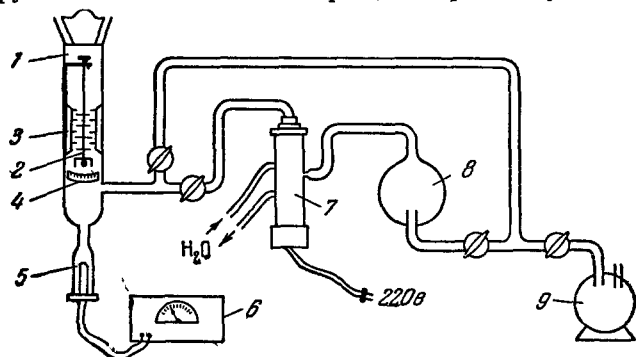


Рис. 2. Схема установки для измерения зависимости вязкости воздуха от давления.

1—Стеклянный цилиндр; 2—вертушка с подвижными пластинками; 3—неподвижные пластинки; 4—шкала; 5—измерительная лампа типа ЛТ-2; 6—термометрический вакуумметр ВТ-2; 7—паромасляный насос ММ-40; 8—форвакуумная колба; 9—форвакуумный насос.

трению о воздух колебания постепенно затухают, и измеряется время затухания или пропорциональное ему число колебаний z , происходящее до уменьшения амплитуды на $1/3$. При атмосферном давлении и до вакуума порядка 1 мм рт. ст. это число остается почти постоянным и составляет 15—20 полных колебаний.

Качественный анализ базируется на расчете движения пластинки толщиной δ и плотностью ρ между двумя неподвижными плоскостями. Сила трения с каждой стороны пропорциональна вязкости воздуха η и градиенту скорости, равному скорости пластинки u , деленной на ширину зазора h между подвижной и неподвижной пластинками. Уравнение движения пластинки имеет вид

$$\frac{du}{dt} = -\frac{2\eta}{\rho\delta h} u. \quad (2)$$

Величина

$$\tau = \frac{\rho\delta h}{2\eta} \quad (3)$$

есть время, в течение которого пластинка проходит примерно $2/3$ своего пути до остановки. По аналогии без детального расчета можно перенести эту закономерность на вращательные колебания вертушки:

$$z\tau_0 \approx \frac{\rho\delta h}{2\eta}. \quad (4)$$

Следовательно, вязкость воздуха η обратно пропорциональна числу колебаний z , происходящему до уменьшения амплитуды на $\sim 1/3$:

$$\eta \sim \frac{1}{z}. \quad (5)$$

Откачивая воздух в колбе до различного давления p , измеряют z и строят график зависимости $\frac{1}{z}$ от p . Согласно молекулярно-кинетической теории, при давлениях,

для которых длина свободного пробега l мала по сравнению с шириной зазора h , вязкость газа не зависит от давления и $\frac{1}{z} = \text{const} = \frac{1}{z_0}$. В интервале давлений $0,1 \div \div 0,01$ мм рт. ст. l становится сравнимым с h и $1/z$ начинает падать. При $l \ll h$

$$\eta \sim \frac{1}{z} \sim p. \quad (6)$$

На рис. 3 показана экспериментальная кривая $\frac{1}{z} = f(p)$. Продолжая пунктиром прямую с начальным наклоном до пересечения с горизонталью $1/z_0$, определяют

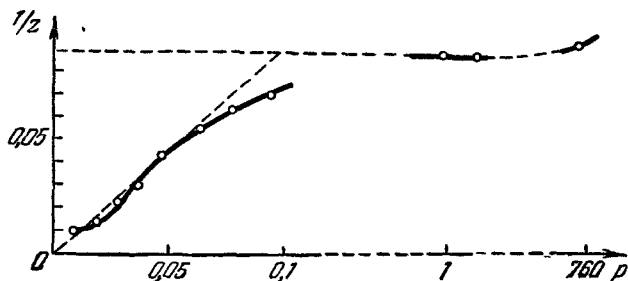


Рис. 3. Примерный ход экспериментальной кривой.

значение давления p_b , при котором $l=h$. Отсюда находят значения длины свободного пробега при атмосферном давлении p_0 :

$$l_0 = h \frac{p_b}{p_0}. \quad (7)$$

При большой линейной скорости u на окружности подвижного диска следует учитывать возможность турбулизации воздушного потока в зазоре. Поскольку определяющий турбулизацию критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{uhQ_r}{\eta} \quad (8)$$

прямо пропорционален плотности газа Q_r , то при давлениях, близких к атмосферному, затухание колебаний может усиливаться. Поэтому за z_0 целесообразно принимать величину z , измеренную при давлениях порядка 1 мм рт. ст. В свою очередь при очень низких давлениях может нарушаться обратная пропорциональность z и p (формула (6)). Когда трение о воздух станет очень слабым, затухание будет главным образом определяться необратимыми потерями механической энергии внутри скручивающейся пилы.

Указанные два обстоятельства обуславливают показанные на рис. 3 отклонения экспериментальных точек от рассмотренных предельных зависимостей.

На выполнение измерений затрачивается несколько больше часа. Результаты измерений позволяют убедиться в справедливости зависимостей внутреннего трения газов от давления, вытекающих из молекулярно-кинетической теории, и оценить длину свободного пробега.

Использование современных методов получения и измерения вакуума (металлический паромасляный насос, термодарный вакуумметр) позволяет избежать в лаборатории паров ртути.

О. М. Тодес и И. И. Петренко