212.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Введение

Молекулярно-кинетическая теория ставит себе целью истолковать те свойства тел, которые непосредственно наблюдаются на опыте (давление, температуру и т. п.), как суммарный результат действия молекул. При этом она пользуется статистическим методом, интересуясь не движением отдельных молекул, а лишь такими средними величинами, которые характеризуют движение огромной совокупности частиц. Отсюда другое ее название — статистическая физика.. Молекула — это наименьшая частица вещества, сохраняющая все химические свойства. Сами молекулы могут состоять из более простых частиц — атомов. Размеры молекул и атомов чрезвычайно малы. Если представить себе эти частицы в виде малых шариков, то их радиус имеет численное значение порядка 10^{-10} м. Зато число частиц в макроскопических телах необычайно велико. В одном грамме воды, например, содержится $3{,}3\cdot10^{22}$ молекул, а в 1 $см^3$ газа при обычных условиях — $2{,}7\cdot10^{19}$ молекул. Газообразное состояние вещества является, пожалуй, самым простым из агрегатных состояний вещества, так как в этом случае силы, действующие между молекулами, очень малы и ими при определенных условиях можно пренебречь. Пренебречь можно также размерами молекул, считая их материальными точками. При таких допущениях молекулы газа должны считаться совершенно свободными. Это значит, что движутся они прямолинейно и равномерно, как всегда движутся тела, не подверженные действию каких либо сил. Измерения и расчеты показывают, что мгновенная скорость движения каждой молекулы газообразного тела является случайно изменяющейся величиной из-за хаотичного столкновения молекул между собой и стенками сосуда. Она варьируется от нуля до тысячи метров в секунду при нормальных условиях и описывается распределением Максвелла. Например, при комнатных условиях средняя скорость поступательного движения у молекул азота составляет около 500 м/с , а у молекул водорода из-за меньшей массы — около 1000 м/с. Однако из-за высокой концентрации обычного газа траектории молекул представляют собой ломаные линии. Средняя длина свободного пробега молекул (от столкновения до столкновения) составляет величину порядка 10^{-7} м. Она в тысячу раз превышает размер самой молекулы. Процесс столкновения молекул газа с поверхностью другого тела, например, стенками сосуда, где находится газ, создает давление. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов связывает микроскопические характеристики газа

(массу m и скорость u молекулы), его концентрацию n с макроскопическими параметрами — давлением p и температурой T:

$$p=\frac{1}{3}nm\langle u^2\rangle=nkT$$

С точки зрения молекулярно- кинетической теории газ представляет собой совокупность отдельных микрочастиц (молекул, атомов, ионов). Для простоты можно считать их абсолютно твердыми шариками. Наблюдение броуновского движения частиц позволяет предположить, что молекулы находятся в непрерывном движении. Большая сжимаемость газов говорит о том, что молекулы газа находятся на большом расстоянии друг от друга.

Закономерно встает вопрос об оценке кинематических параметров этой картины. К ним относится средняя длина свободного пробега молекул $\langle\lambda\rangle$ (расстояние, которое пролетает молекула между двумя столкновениями) и среднее эффективное сечение столкновения $\langle\sigma\rangle=0,25\pi\langle D\rangle^2$ (где D — максимальное расстояние между центрами сталкивающихся молекул , при котором происходит изменение их скорости : эффективный диаметр молекулы). Среднее эффективное сечение столкновения является количественной мерой интенсивности столкновений. Чем чаще сталкиваются молекулы, тем больше сечение столкновений.

Цель работы

Определение кинематических параметров молекул воздуха.

Задачи работы

1. Использование физических положений, связывающих кинематические параметры с вязкостью воздуха;
2. Освоение метода Пуазейля измерения вязкости газа;
3. Измерение вязкости воздуха методом Пуазейля;
4. Оценка средней длины свободного пробега, частоты и эффективного сечения столкновений молекул воздуха

Очевидно, что сечению столкновения будет пропорциональна средняя скорость столкновений $\langle\omega\rangle$. Если концентрация молекул равна n, а средняя скорость теплового движения $\langle u\rangle$, то

$$\langle\omega\rangle=\sqrt{2}\langle\sigma\rangle\langle n\rangle\langle u\rangle \qquad (1)$$

В этой формуле учтено, что средняя относительная скорость движения молекул в $\sqrt{2}$

больше средней скорости их движения $\langle u \rangle$.

Среднюю длину свободного пробега $\langle \lambda \rangle$ можно получить, поделив средний путь, проходимый молекулой за единицу времени, на число столкновений $\langle z \rangle = 1/\langle \sigma \rangle$ за это же время. Так как путь, проходимый в единицу времени, численно равен скорости, то :

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle u \rangle}{\langle \omega \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2}\langle \sigma \rangle \langle n \rangle} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi \langle D \rangle^2 \langle n \rangle} \tag{2}$$

Таким образом, простейшие выражения механики позволяют связать между собой микропараметры газа.

С другой стороны, на основании представлений молекулярно-кинетической теории газов, в случае справедливости распределения Максвелла по скоростям можно найти связь между динамической вязкостью η и этими параметрами:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle u \rangle \quad , \tag{3}$$

(ρ — плотность газа)

В состоянии равновесия , когда справедливо распределение Максвелла по скоростям

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8\mathrm{RT}}{\pi \mu}} \quad , \tag{4}$$

где R – газовая постоянная, μ — молярная масса газа.

Таким образом, выражение для средней длины свободного через макропараметры :

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle u \rangle} = \frac{3\eta\sqrt{\pi \mu}}{\rho\sqrt{8\mathrm{RT}}} \quad . \tag{5}$$

Т.е., измерив температуру, коэффициент вязкости и, зная молярную массу воздуха, можно вычислить по формуле (5) длину свободного пробега, и далее по формуле (2) оценить среднее сечение столкновения.

Экспериментальная установка

Идея эксперимента основана на использовании формулы Пуазейля (см. раздел «Явления переноса» для объемного расхода газа Q, ламинарно протекающего по цилиндрической трубе радиуса r и длины l под действием постоянного перепада давления Δp на концах трубы :

$$Q = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \Delta p \quad . \tag{6}$$

Таким образом, для нахождения коэффициента вязкости воздуха необходимо измерить его объемный расход через трубку-капилляр известной длины и внутреннего радиуса и разницу давление на концах капилляра :

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8l} \frac{\Delta p}{Q} \quad . \tag{7}$$

Эксперимент выполняется на установке, схема которой показана на рисунке. Капилляр К соединен с наполненным водой сосудом Г и водяным манометром М трубкой. Воду выпускают через регулируемый вентиль В1, чтобы создать нужный перепад давления Δр на концах капилляра. Создаваемое разряжение контролируют манометром М (чем больше разница высот Δh столбиков воды в манометре, тем больше $\Delta p = \rho_в g \Delta h$, где $\rho_в$ — плотность воды при температуре опыта, g – ускорение свободного падения). В результате воздух всасывается через капилляр в сосуд Г. Объем воды, вытекающей в единице времени, измеряют мерным стаканом С и секундомером. Он равен объему воздуха, протекающего через капилляр за это время. Вентиль В2 с воронкой служит для возвращения воды из мерного стакана в сосуд Г перед очередным измерением.

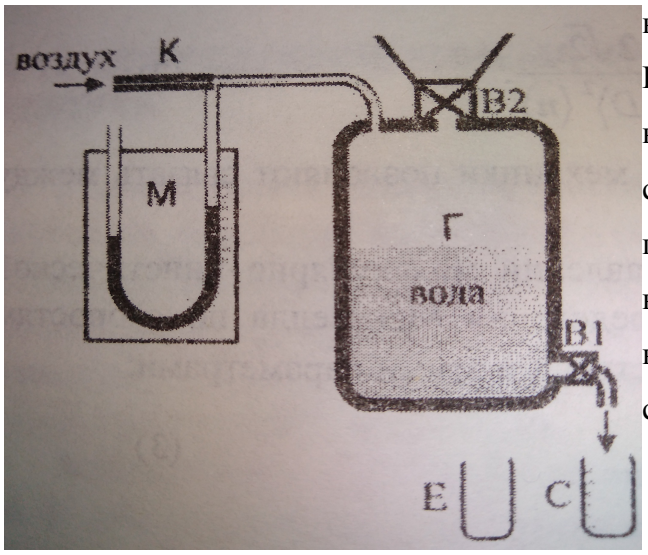

Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Техника безопасности

Внимание: в работе используется стекло.
Будьте предельно аккуратны при работе со стеклянным сосудом.

Порядок выполнения работы

. 1. Подставить вспомогательную емкость Е под вентиль В1 и, аккуратно открыть его, создав максимально возможный перепад Δh в манометре. Подождать до тех пор, пока показания манометра перестанут заметно изменяются (течение стабилизируется) и измерить Δh_1. Не трогая вентиль, заменить емкость Е мерным стаканом С. Измерить

время вытекания некоторой заранее определенной порции воды *V,* и соответствующую этому измерению. Конечную разность уровней в манометре Δh_2. Закрыть вентиль В1. Воду из стакана и вспомогательной емкости вылить в воронку и слить воду в сосуд Г. (*Объем вытекшей воды V задается, исходя из необходимой точности измерений времени. Пусть, например, Вам необходимо проводить измерения с относительной погрешностью 10 %. Т.к. Время фиксируется ручным секундомером, проводить измерения точнее 0,3 с (время реакции человека) невозможно. Значит, заданная относительная погрешность может быть обеспечена при измерении промежутков времени не менее 3 с. Следовательно, необходимо заплнять стакан не менее 3 с. если относительная погрешность должна быть 1%, то время измерения должно быть соответственно увеличено в 10 раз.*)

. 2. Вычислить среднее значение перепада давления на концах капилляра:

$$\Delta p = \rho_в g \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2} \quad .$$

. 3. Измерить температуру воды для определения ее плотности. .

. 4. Вычислить объемный расход воздуха по формуле $Q = V / t$.

. 5. Проделать измерения и расчеты, указанные в пунктах 1-3 , при 8-10 меньших значениях Δp, чтобы построить график зависимости Q(Δp). Откладывать значения *Q* вдоль оси ординат, а Δp – вдоль оси абсцисс.

. 6. Проанализируйте полученную зависимость $Q(\Delta p)$ на соответствие формуле Пуазейля (6). В области малых Δp зависимость должна быть линейной, причем Q(0)=0. В противном случае измерения и расчеты нужно выполнить более аккуратно.

. 7. Используя экспериментальные данные и формулу (7), вычислить среднее значение вязкости воздуха. Длина капилляра l и радиус r указаны на установке.

. 8. Вычислить длину свободного пробега молекул воздуха по формуле (5).

. 9. Измерить атмосферное давления p барометром.

. 10. По формуле (2) вычислить среднее эффективное сечение столконовения, учитывая, что

$$\langle n \rangle = \frac{P}{kT} \quad .$$

. 11. Оценить диаметр молекулы и частоту столкновений молекул воздуха.

Контрольные вопросы и задания.

1. Связь между микро и макропараметрами газа. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.

2. Вывод уравнения Пуазейля.

3. Зависимость вязкости газа от температуры и от давления.

4. Как в рамках молекулярно-кинетических представлений объясняется вязкость газа?

5. Познакомьтесь с выводом уравнения связывающего коэффициент вязкости и параметры молекулярного движения.

6. Как зависят длина свободного пробега и частота столкновений молекул газа от температуры и давления?

7. Физический смысл эффективного сечения столкновений.

8. Какова средняя скорость теплового движения молекул воздуха при комнаьной температуре? Какова частота столкновений молекул при этом?

9. Как влияет диаметр сосуда Г на результат измерений?

10. Как влияет уровень жидкости в сосуде Г на результаты измерений?

11. Почему по мере вытекания воды из сосуда Г разность уровней в манометре уменьшается?

. 12. Влияет ли длина и диаметр трубки на которой стоит вентиль В1 на результаты измерений?