

§ 243. Скорости молекул газа. Каковы скорости, с которыми движутся молекулы, в частности молекулы газов? Этот вопрос естественно возник тотчас же, как были развиты представления о молекулах. Долгое время скорости молекул удавалось оценить только косвенными расчетами, и лишь сравнительно недавно были разработаны способы прямого определения скоростей газовых молекул.

Прежде всего уточним, что надо понимать под скоростью молекул. Напомним, что вследствие беспрестанных столкновений скорость каждой отдельной молекулы все время меняется: молекула движется то быстро, то медленно, и в течение некоторого времени (например, 1 секунды) скорость молекулы принимает множество самых различных значений. С другой стороны, в какой-нибудь определенный момент в громадном числе молекул, составляющих рассматриваемый объем газа, имеются молекулы с самыми различными скоростями. Очевидно, для характеристики состояния газа надо говорить о некоторой средней скорости. Можно считать, что это есть средняя величина скорости одной из молекул за достаточно длительный промежуток времени или что это есть средняя величина скоростей всех молекул газа в данном объеме в какой-нибудь момент времени.

Остановимся на рассуждениях, которые дают возможность подсчитать среднюю скорость газовых молекул.

В § 221 мы показали, что давление газа пропорционально $n m v^2$, где m — масса молекулы, v — средняя скорость, а n — число молекул в единице объема. Более точный расчет приводит к формуле

$$p = \frac{1}{3} n m v^2. \quad (12,9)$$

Пусть молекулы имеют среднюю скорость v и вдоль каждого ребра куба пролетает одинаковое число молекул, т. е. одна треть общего числа: $\frac{1}{3} n l^3$. Отразившись от стенки, молекула летит к противоположной, т. е. пролетает путь l ; отразившись там, она, пройдя еще раз путь l , вновь ударится о первую стенку. Таким образом, каждая молекула повторяет свои удары через время t , необходимое, чтобы пролететь путь $2l$, т. е. $t = \frac{2l}{v}$. За 1 секунду молекула ударится о стенку $\frac{1}{t} = \frac{v}{2l}$ раз. Так как по этому направлению пролетают $\frac{1}{3} n l^3$ молекул, то общее число ударов, испытанных стенкой за 1 секунду со стороны всех молекул, равно $\frac{1}{3} n l^3 \cdot \frac{v}{2l} = \frac{1}{6} n v l^2$. Площадь стенки равна l^2 , следовательно, на 1 см^2 за 1 секунду придется число ударов, равное $\frac{1}{6} n v$. Итак, мы нашли $N = \frac{1}{6} n v$. Зная N , мы найдем и давление газа, равное, как было показано в § 221, $2N m v$. Итак, давление газа

$$p = \frac{1}{3} n m v^2.$$

Из формулы (12,9) можно вывести ряд важных следствий. Перепишем формулу (12,9) в таком виде:

$$p = \frac{2}{3} \frac{m v^2}{2} = \frac{2}{3} \varepsilon,$$

где ε («эпсилон» — греческая буква) — средняя кинетическая энергия одной молекулы. Обозначим давление газа при температурах T_1 и T_2 буквами p_1 и p_2 , а средние кинетические энергии молекул при этих температурах ε_1 и ε_2 . В таком случае

$$p_1 = \frac{2}{3} \varepsilon_1, \quad p_2 = \frac{2}{3} \varepsilon_2 \text{ и } \frac{p_1}{p_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

Сравнивая это соотношение с законом Шарля $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$, найдем:

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}.$$

Итак, абсолютная температура газа пропорциональна средней кинетической энергии молекул газа. Напомним, что о связи температуры газа и средней кинетической энергии его молекул мы уже говорили в § 216. Так как средняя кинетическая энергия молекул пропорциональна квадрату средней скорости молекул, то наше сопоставление приводит к выводу, что абсолютная температура газа пропорциональна квадрату средней скорости молекул газа и что скорость молекул *растет пропорционально корню квадратному из абсолютной температуры*.

Теперь возьмем два разных газа при одинаковых температурах и давлениях. Согласно закону Авогадро (§ 241) число молекул в единице объема одинаково. В таком случае мы можем написать:

$$p = \frac{1}{3} n m_1 v_1^2 = \frac{1}{3} n m_2 v_2^2,$$

где индексы 1 и 2 относятся к первому и второму газам. Отсюда

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}, \quad (12,10)$$

т. е. при данной температуре средние скорости молекул обратно пропорциональны корням квадратным из масс молекул. Например, в смеси кислорода и водорода средняя скорость молекул кислорода в четыре раза меньше средней скорости молекул водорода.

Наконец, обратим внимание на то, что произведение $n m$ есть масса всех молекул газа, находящихся в 1 см³, т. е. произведение $n m$ есть плотность газа d . Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{3p}{d}}.$$

Эта формула дает возможность вычислить скорости газовых молекул, если известны давление и плотность газа. Результаты вычислений средних скоростей молекул различных газов при 0° С приведены в таблице 8.

Таблица 8

Средние скорости молекул некоторых газов

Газ	Масса молекулы в г	Средняя скорость в м/сек
Водород	$0,33 \cdot 10^{-23}$	1760
Кислород	$5,3 \cdot 10^{-23}$	425
Азот	$4,6 \cdot 10^{-23}$	450
Углекислый газ . . .	$7,3 \cdot 10^{-23}$	360
Пары воды	$3,0 \cdot 10^{-23}$	570

Как видно, средние скорости молекул весьма значительны. При комнатной температуре они обычно достигают сотен метров в секунду. В газе средняя скорость движения молекул примерно в полтора раза больше, чем скорость звука в этом же газе.

На первый взгляд этот результат кажется очень странным. Кажется, что молекулы не могут двигаться с такими большими скоростями: ведь диффузия даже в газах, а тем более в жидкостях, идет сравнительно очень медленно, во всяком случае гораздо медленнее, чем распространяется звук. Дело, однако, в том, что, двигаясь, молекулы очень часто сталкиваются друг с другом и при этом меняют направление своего движения. Вследствие этого они двигаются то в одну, то в другую сторону, в основном толкуются на одном месте. В результате, несмотря на большую скорость движения в промежутках между столкновениями, несмотря на то, что молекулы нигде не задерживаются, они продвигаются в каком-либо определенном направлении довольно медленно.

Таблица 8 показывает также, что различие в скоростях разных молекул связано с различием их масс. Это обстоятельство подтверждается рядом наблюдений. Например, водород проникает сквозь узкие отверстия (поры) с большей быстротой, чем кислород или азот. Можно обнаружить это на таком опыте (рис. 427).

Стеклянная воронка закрыта пористым сосудом или заклеена бумагой и опущена концом в воду. Если воронку накрыть стаканом, под который впустить водород (или светильный газ), то увидим, что уровень воды в конце воронки понизится и из нее начнут выходить пузыри. Как это объяснить?

Сквозь узкие поры в сосуде или бумаге могут проходить и молекулы воздуха (изнутри воронки под стакан), и молекулы водорода (из-под стакана в воронку). Но быстрота этих процессов различна. Различие в размерах молекул не играет при этом существенной роли, ибо различие это невелико, особенно по сравнению с размерами пор: молекула водорода имеет «длину» (§ 214) около $2,3 \cdot 10^{-8}$ см, а молекула кислорода или азота — около $3 \cdot 10^{-8}$ см, поперечник же отверстий, которые представляют собой поры, в тысячи раз больше. Большая быстрота проникновения водорода через пористую стенку объясняется большей скоростью движения его молекул. Поэтому молекулы водорода быстрее проникают из воронки под стакан. В результате в воронке получается накопление молекул, давление увеличивается и смесь газов в виде пузырьков выходит наружу.

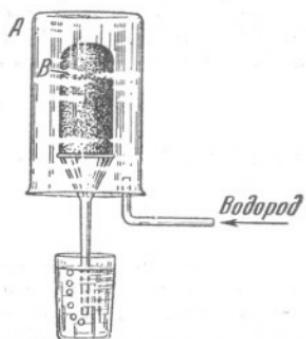


Рис. 427. Когда пространство под стаканом *A* наполнено водородом, то из конца воронки, закрытой пористым сосудом *B*, выходят пузыри.

Отметим, что подобными приборами пользуются для обнаружения примеси рудничных газов к воздуху, могущих вызвать взрыв в рудниках.

Упражнения. 243.1. Если в только что описанном опыте снять стакан с воронки, наполненной водородом, то вода начинает втягиваться внутрь воронки. Объясните явление.

243.2. Вычислите, пользуясь таблицей 7, среднюю скорость молекул гелия и углекислого газа при температуре 0°C .

243.3. Пользуясь таблицей 8, вычислите средние скорости: а) молекул водорода при 1000°C ; б) молекул азота при -100°C .

§ 244. Об одном способе измерения скоростей движения молекул газа (опыт Штерна). Существуют разнообразные способы определения и вычисления скоростей движения молекул. Одним из наиболее прямых и интересных является способ, осуществленный в опыте Штерна (в 1920 г.).

Для понимания его рассмотрим следующую аналогию. Когда стреляют по движущейся мишени, то, чтобы попасть в нее, приходится целиться в точку, находящуюся впереди мишени. Если же взять прицел на самую мишень, то пули будут попадать сзади мишени (считая по направлению ее

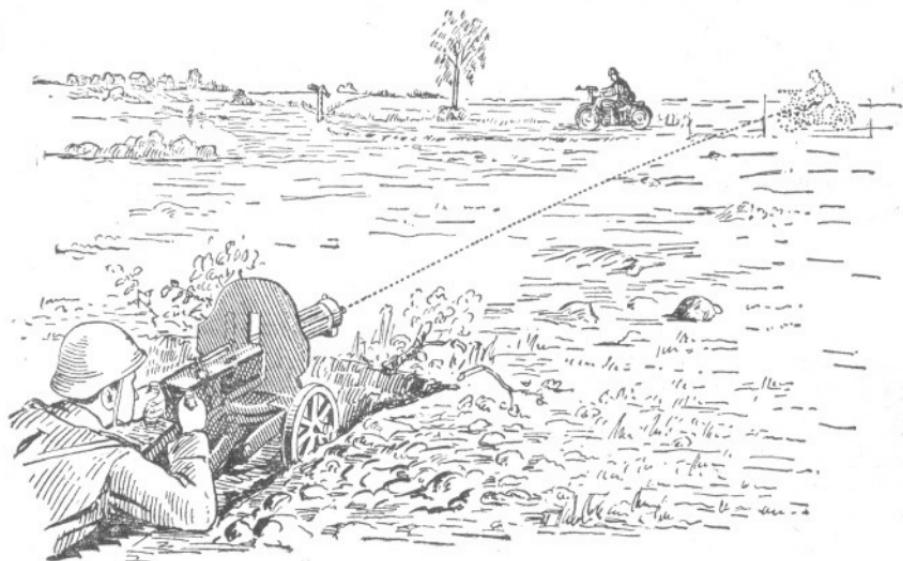


Рис. 428. Если стрелять из пулемета по движущейся мишени так, что ствол пулемета направлен на мишень, то пули будут ложиться сзади мишени.

движения, рис. 428). Это отклонение места попадания от цели будет, как не трудно сообразить, тем больше, чем быстрее движется мишень и чем меньше скорость пули.

Рассмотрим еще такой опыт. На столике, который может вращаться, помещен высокий сосуд с водой (рис. 429). Из отверстия в сосуде бьет струя воды. Если столик не вращается, струя попадает в стакан, укрепленный на том же столике. Стоит, однако, начать вращать столик, как струя воды уже будет попадать не в стакан, а сзади него. Отставание струи будет тем больше,

чем быстрее вращается столик и чем меньше скорость частиц в струе. Зная скорость вращения и измерив, насколько отклоняется струя, можно, очевидно, судить о скорости струи. Нечто аналогичное представляет опыт Штерна. Струе воды в нем соответствует поток молекул.

Устройство прибора Штерна схематически представлено на рис. 430. Прибор состоит из трубочки *A* (электрическая печка), в которой электрическим током нагревается металл (например, серебро), щели *B* и цилиндра *C*. Цилиндр *C* вместе с печкой *A* и щелью *B* можно быстро вращать вокруг оси, проходящей через *A* и перпендикулярной к плоскости чертежа. Воздух из прибора выкачен, и в нем поддерживается очень низкое давление непрерывно

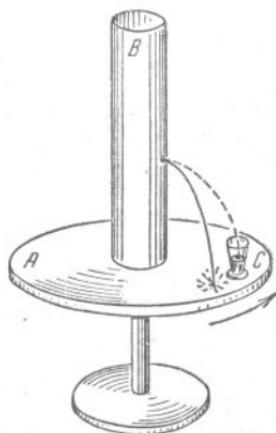


Рис. 429. При неподвижном столике *A* струя воды из сосуда *B* попадает в стакан *C*. При вращении столика *A* струя воды падает сзади стакана *C*.

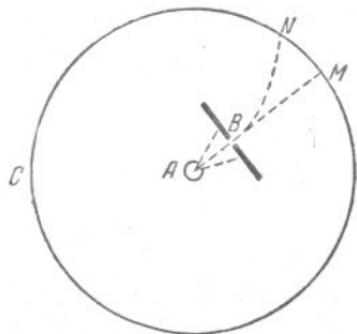


Рис. 430. Схема прибора Штерна для определения скорости молекул паров металла. Если прибор вращается по стрелке часов, то налет серебра получается в точке *N*.

работающим насосом. При нагревании серебра в печке *A* оно начинает испаряться и из печки вылетают молекулы (атомы) серебра, движущиеся со скоростью их молекулярного движения. Щель *B* выделяет направленный пучок молекул (печка *A* и щель *B* заменяют здесь ружье в указанном выше примере). Стенка цилиндра специально охлаждается, чтобы попадающие на нее молекулы «прилипали» к ней, образуя налет серебра. Сперва прибор покоялся и налет серебра образуется в точке *M*.

Теперь предположим, что весь прибор привели во вращение. Тогда, хотя прицел «молекулярного ружья» *AB* взят в ту же точку *M*, но цель движется и пули (молекулы) будут попадать уже не в точку *M*, а в точку *N*, лежащую позади нее, при вращающемся приборе налет серебра будет образовываться в точке *N*.

Вычислим длину *s* дуги *MN*. Она равна пути, проходимому точками цилиндра за время *t* полета молекулы от *B* до цилиндра, т. е. $s = ut$, где *u* — скорость движения точек цилиндра. С другой стороны, если обозначить скорость молекул через *v*, а расстояние *BM* через *l*, то $t = \frac{l}{v}$, так что $s = \frac{ul}{v}$ или $v = \frac{ul}{s}$. Величина *s* измеряется по расстоянию между налетами металла на цилиндре при покоящемся и вращающемся цилиндрах, скрость

точек на поверхности цилиндра и (при вращении) и расстояние l тоже могут быть измерены. Тогда, пользуясь последней формулой, можно найти скорость молекул. Таким образом были измерены скорости молекул паров некоторых металлов.

Упражнение. 244.1. При опытах Штерна налет серебра при покоящемся приборе получается в виде узкой полоски, а при вращающемся приборе — несколько размытым. На что это указывает?