

ISSN 1811-1807

ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛ

С. ТОРАЙҒЫРОВ АТЫНДАҒЫ ПАВЛОДАР МЕМЛЕКЕТТІК УНИВЕРСИТЕТІ



4 '2007



ПМУ хабаршысы
Вестник ПГУ

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКАЛЫҚ СЕРИЯ

УДК 539.19

СТОЛКНОВЕНИЯ МОЛЕКУЛ

З.Ж. Оразалинова
Павлодарский государственный университет
им. С. Торайгырова

Нағыз мақалада молекулардың сақтығылуының факторы мен шарттары зерттеледі.

В настоящей статье исследуются факторы и условия столкновения молекул.

In the present article are researched factors and conditions of molecular collisions.

Молекулы движутся совершенно беспорядочно хаотически. Все направления движения равновероятны, ни одному из них не может быть отдано предпочтение перед другими. Скорости молекул могут быть самыми различными по величине. При каждом соударении с другими молекулами величина скорости данной молекулы должна, вообще говоря, изменяться, причем с равной вероятностью она может как возрасти, так и уменьшиться.

Изменение скоростей молекул при столкновениях происходит случайным образом. Может случиться, что какая-то молекула в целом ряде последовательных соударений будет получать энергию от своих партнеров по столкновениям, в результате чего ее энергия значительно превзойдет среднее значение (ϵ). Однако, даже если представить себе такой совершенно фантастический случай, при котором все молекулы газа останутся, передав свою энергию одной-единственной молекуле, то и тогда энергия этой молекулы, а следовательно и ее скорость, будет конечна. Таким образом, скорость молекул газа вообще не может иметь значений, начиная с некоторого v_{max} до ∞ . Учитывая, что

процессы, которые привели бы к сосредоточению на одной молекуле заметной доли суммарной энергии всех молекул, маловероятны, можно утверждать, что слишком большие по сравнению со средним значением скорости могут реализоваться крайне редко. Точно так же практически исключено, что в результате соударений скорость молекулы станет равной точно нулю.

Следовательно, очень малые и очень большие по сравнению со средним значением скорости маловероятны, причем вероятность данного значения v стремится к нулю как при $v = 0$ так и при $v \rightarrow \infty$.

Из сказанного следует, что скорости молекул группируются в основном вблизи некоторого наиболее вероятного значения. Соударения приводят к изменению направлений движения молекул. Число возможных направлений в пространстве бесконечно велико. Реализуется же в каждый момент времени конечное число направлений, равное рассматриваемому количеству молекул. Поэтому постановка вопроса о числе молекул, имеющих заданное направление движения, лишена смысла. Действительно, поскольку число направлений бесконечно велико, а число молекул конечно, вероятность того, что в строго определенном направлении летит хотя бы одна молекула равна нулю.

Термин «столкновение» применительно к молекулам не следует понимать буквально и представлять себе этот процесс подобным соударению твердых шаров. Под столкновением молекул подразумевают процесс взаимодействия между молекулами, в результате которого молекулы изменяют направление своего движения.

На рис. 1 показана кривая, изображающая взаимную потенциальную энергию двух молекул как функцию расстояния r между их центрами. Рассмотрим с помощью этой кривой процесс сближения (соударения) молекул. Помес-

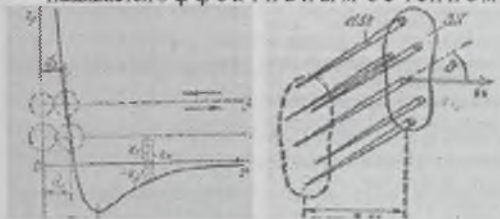
тим мысленно центр одной из молекул в начало координат, а центр второй молекулы представим перемещающимся по оси g . Пусть вторая молекула летит по направлению к первой из бесконечности, имея начальный запас кинетической энергии $e_k = e_1$. Приближаясь к первой молекуле, вторая под действием силы притяжения движется со все возрастающей скоростью. В результате кинетическая энергия молекулы e_k также растет. Однако полная энергия системы, равная $e = e_k + e_p$, остается неизменной (система двух молекул замкнута) и равной e_1 так как одновременно уменьшается потенциальная энергия e_p . При прохождении молекулой точки с координатой g_0 силы притяжения сменяются силами отталкивания, вследствие чего молекула начинает быстро терять скорость (в области отталкивания кривая e_p идет очень круто). В момент, когда потенциальная энергия e_p становится равной полной энергии системы e_1 , скорость молекулы обращается в нуль. В этот момент имеет место наибольшее сближение молекул друг с другом. После остановки молекулы все явления протекают в обратной последовательности: сначала молекула движется со все возрастающей скоростью под действием силы отталкивания; миновав расстояние g_0 , молекула попадает под действие замедляющей ее движение силы притяжения и, наконец, удаляется на бесконечность, имея первоначальный запас кинетической энергии e_1 .

Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы d

Величина

$$s = \rho d^2 \quad (1)$$

называется эффективным сечением молекулы.



Из рис.1 видно, что в случае, когда молекула начинает свое движение из бесконечности с большим запасом энергии, минимальное расстояние, на которое сближаются центры молекул, оказывается меньшим. Таким образом, эффективный диаметр молекул зависит от их энергии, а следовательно, и от температуры. С повышением температуры эффективный диаметр молекул уменьшается.

За секунду молекула проходит в среднем путь, равный средней скорости $\langle u \rangle$.

Если за секунду она претерпевает в среднем n столкновений, то средняя длина свободного пробега будет равна

$$l = \frac{\langle u \rangle}{n} \quad (2)$$

Для того чтобы подсчитать среднее число столкновений ν , предположим вначале, что все молекулы, кроме данной, застыли неподвижно на своих местах. Проследим за движением выделенной нами молекулы. Ударившись об одну из неподвижных молекул, она будет лететь прямолинейно до тех пор, пока не столкнется с какой-либо другой неподвижной молекулой. Это соударение произойдет в том случае, если центр неподвижной молекулы окажется от прямой, вдоль которой летит молекула, на расстоянии, меньшем эффективного диаметра молекулы d . В

результате столкновения молекула изменит направление своего движения, после чего некоторое время опять будет двигаться прямолинейно, пока на ее пути снова не встретится молекул, центр которой будет находиться в пределах цилиндра радиуса d .

За секунду молекула проходит путь, равный $\langle u \rangle$. Число происходящих за это время соударений с неподвижными молекулами равно количеству молекул, центры которых попадают внутрь колеччатого цилиндра длины $\langle u \rangle$ и радиуса d . Средняя длина свободного пробега много больше, чем эффективный диаметр молекул d . Поэтому объем цилиндра можно считать равным $\pi d^2 \langle u \rangle$. Умножив этот объем на число молекул в единице объема n , получим среднее число столкновений за секунду движущейся молекулы с неподвижными:

$$n' = \pi d^2 \langle u \rangle n \quad (3)$$

В действительности все молекулы движутся, вследствие чего число соударений определяется средней скоростью движения молекул по отношению друг к другу.

Средние квадратичные скорости пропорциональны средним арифметическим.

$$\langle u_{\text{сред}} \rangle = \sqrt{2} \langle u \rangle \quad (4)$$

Заменив в формуле (3) $\langle u \rangle$ на $\langle u_{\text{сред}} \rangle$, получим для среднего числа столкновений за секунду выражение

$$n = \sqrt{2} \pi d^2 \langle u \rangle n \quad (5)$$

Подставив это значение n в (2), получим для средней длины свободного пробега следующую формулу:

$$l = \frac{l}{\sqrt{2} \pi d^2 n} \quad (6)$$

Выше отмечалось, что эффективный диаметр молекул убывает с ростом температуры. В соответствии с этим при повышении температуры длина свободного пробега увеличивается.

Оценим величину средней длины свободного пробега и среднее число столкновений в секунду. Молекулы имеют размеры порядка нескольких ангстрем. Примем эффективный диаметр молекулы равным $2 \cdot 10^{-10}$ м. Моль газа занимает при нормальных условиях (т. е. при 0°C и $p=1$ атм) объем, равный $22,4 \cdot 10^{-3}$ м³. Число молекул в единице объема при этих условиях равно $6 \cdot 10^{23} : 22,4 \cdot 10^{-3} \approx 3 \cdot 10^{25}$ м⁻³. Подстановка этих чисел в формулу (6) дает

$$l = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 3,4 \cdot 4 \cdot 10^{-10} \cdot 3 \cdot 10^{25}} \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$$

При давлении, равном 10^{-3} мм рт. ст. (что соответствует примерно 10^6 атм), l будет порядка 10 см. Если сосуд имеет размеры порядка нескольких сантиметров, то при таком давлении молекулы будут двигаться от стенки к стенке практически без столкновений друг с другом. При давлении, равном 10^{-6} мм рт. ст., l достигает величины порядка десятков метров.

При выводе формулы (3) мы предположили, что l много больше d . Теперь мы можем убедиться в правильности такого предположения. Действительно, из произведенной оценки следует, что при нормальных условиях отношение l к d составляет примерно $2 \cdot 10^{-5} : 2 \cdot 10^{-10} = 10^5$.

Число столкновений в секунду можно получить, разделив среднюю скорость молекул $\langle u \rangle$ на l . Мы получили для кислорода значение $\langle u \rangle$ порядка 500 м/с. Разделив эту величину на $l = 2 \cdot 10^{-7}$ м, получим для числа столкновений в секунду значение, равное $2,5 \cdot 10^9$ с⁻¹. Таким образом, при нормальных условиях число столкновений составляет несколько миллиардов в секунду. С уменьшением давления число столкновений убывает, изменяясь пропорционально p .

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. т. 1. - М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982.-432с.

2. Ремизов А.Н., Потапенко А.Я. Курс физики: Учебник для ВУЗов. - М.: Наука, ДРОФА, 2002.-349с.

3. Лифшиц Е.М., Ландау Э.К. Механика: Учебное пособие. М., 1989.-415с.