(Начало см. на с. 30)

кулы движутся с одной и той же скоростью v, причем в направлении от горячей стенки к холодной летит 1/6 часть молекул (это — одно из направлений вперед – назад, вверх – вниз или вправо – влево) и 1/6 часть летит навстречу. Остальные молекулы в этой модели летят параллельно стенкам. Если концентрация молекул воздуха n, то за единицу времени о площадку S ударятся

$$Z = \frac{1}{6} nvS$$

молекул. Так как скорость зависит только от температуры (напомним, что средняя квадратичная скорость равна $v = \sqrt{3kT/m}$, где m — масса молекулы), то в предположении, что молекулы летят от горячей стенки прямо к холодной и бережно доносят до нее всю избыточную энергию, поток энергии от стенки к стенке (т.е. энергия, переносимая за единицу времени), равный

$$P = \alpha k(T_1 - T_2)Z = \frac{1}{6}\alpha knvS(T_1 - T_2),$$

оказывается пропорциональным не только площади и разности температур, но и концентрации молекул, а значит, и давлению газа $p = nkT$. Таким образом, чем ниже плотность газа и его давление, тем хуже он проводит тепло.

Однако все это правильно только для очень разреженного газа. В обычном газе любая молекула до соударения с другой молекулой пролетает расстояние значительно меньшее, чем расстояние между стенками. Можно сказать, что передача энергии от стенки к стенке происходит эстафетным способом. (Мы отвлекаемся от передачи энергии с помощью конвекции — в узком промежутке между стенками колбы термоса конвекция несущественна.) Температура молекул между стенками линейно уменьшается от T_1 до T_2, и энергия передается по цепочке — от более «горячих» молекул к более «холодным». Но эстафетный способ менее эффективен, чем прямой, — ведь к холодной стенке подлетают не молекулы от горячей стенки, несущие полный запас избыточной энергии, а молекулы из близлежащих, более холодных областей.

Чтобы оценить влияние соударений между молекулами, введем среднюю длину свободного пробега, которую обозначим λ. Как видно из названия, это есть не что иное, как среднее расстояние, которое молекула проходит между двумя соударениями. Будем для простоты считать, что все летящие от

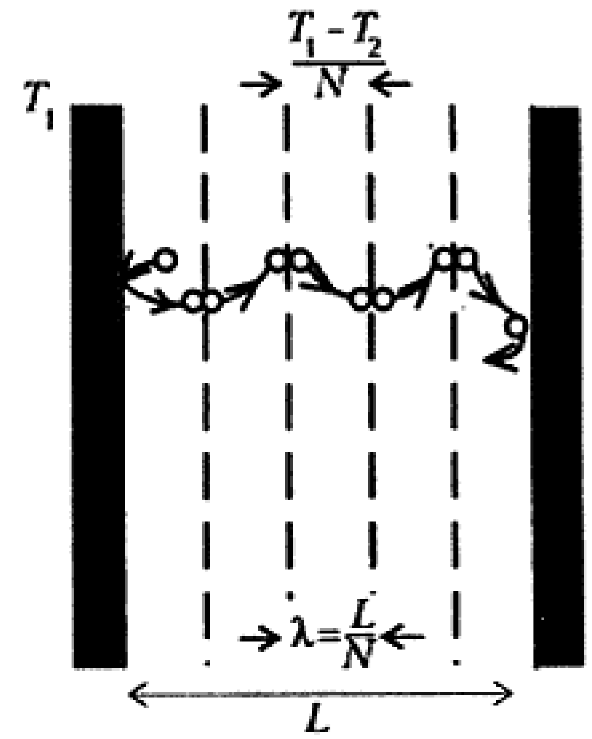

Рис. 1

стенки к стенке молекулы испытывают соударения, пролетев расстояние λ. Тогда расстояние между стенками L разделится на $N = L/\lambda$ областей (рис.1), причем избыточная энергия летящих по направлению к холодной стенке молекул определяется температурой той плоскости, где произошло последнее столкновение, т.е. постепенно уменьшается от области к области. Переносимая через каждый слой энергия равна разности энергий молекул, которые летят к холодной стенке и которые летят им навстречу. Так как разность температур между «стенками» области равна $(T_2 - T_1)/N$, то поток энергии между ними равен

$$P_N = \alpha kZ\lambda\frac{T_1 - T_2}{L} = \frac{1}{6}\alpha knvS\lambda\frac{T_1 - T_2}{L}.$$

Осталось понять, от чего и как зависит длина свободного пробега. Представим все молекулы шариками диаметром d и будем считать, что движется только одна молекула, а остальные молекулы хаотически разбро-

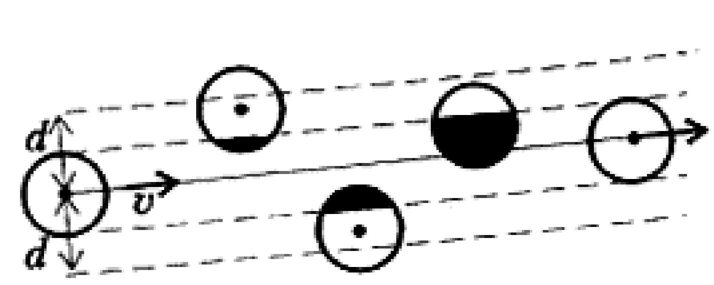

Рис. 2

саны по объему, неподвижны и, более того, как бы «прозрачны» для выделенной молекулы. Посчитаем, сколько молекул она «не заметила» за одну секунду (хотя должна была с ними столкнуться), пролетев расстояние v. Нетрудно понять, что наша молекула задела бы все шарики, центры которых окажутся на расстоянии меньшем d от линии движения ее центра (рис.2), т.е. которые попадут в цилиндр радиусом d и высотой v. Число таких центров равно $n\left(\pi d^2 v\right)$. Значит, среднее расстояние между соударениями равно

$$\lambda = \frac{v}{n\pi d^2 v} = \frac{1}{n\pi d^2}.$$

Длина свободного пробега оказалась обратно пропорциональной концентрации молекул.

Поскольку поток энергии между стенками зависит от произведения $n\lambda$, получается, что при постоянной температуре поток энергии от стенки к стенке не зависит ни от плотности газа, ни от его давления. Этот парадоксальный и неожиданный результат был впервые предсказан Дж.Максвеллом, и его экспериментальное подтверждение было важным успехом молекулярно-кинетической теории.

Но как же термос? Выходит, что, сколько ни откачивай воздух, никакого толка не будет? Не волнуйтесь, с термосом все в порядке. Чем больше мы откачиваем воздух, тем больше становится длина свободного пробега. Когда она превысит расстояние между стенками L, вступит в действие прямой способ передачи энергии — непосредственно от стенки к стенке, при котором, как мы убедились, поток энергии пропорционален плотности газа (и не зависит от расстояния между стенками).

Оценим, до каких давлений надо добраться. Если $\lambda \approx L$, то $n \approx 1/\left(\pi d^2 L\right)$. Пусть расстояние между стенками $L = 3$ мм, а диаметр молекул (из таблиц) $d \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м. Тогда для температуры $T = 300$ К получим $p = nkT \approx 5$ Па. Только с этого давления начнется уменьшение теплопроводности. Например, при давлении 0,1 Па поток тепла будет в несколько десятков раз меньше, чем без откачки. Но это давление в миллион раз меньше, чем атмосферное.

Один мой знакомый предложил применить принцип работы термоса для утепления окон. Достаточно откачать воздух между рамами, — убеждал он, — и тепло через стекла уходить не будет. Я возразил, что при сильной откачке трудно (и дорого) будет обеспечить герметичность, но главное — стекла будут со страшной силой прижиматься друг к другу атмосферным давлением. (Оцените сами, какие возникнут нагрузки.) А зачем сильно откачивать? — ответил автор проекта, — откачаем немного, и уже станет лучше!

Теперь вы знаете, как ему возразить?