

Эстафетный бег молекул, или Как работает термос

А. ЧЕРНОУЦАН

КАЖДЫЙ понимает, как устроен термос. Особенно тот, кто хоть раз ронял колбу от термоса на пол, — звук примерно такой же, как от лопнувшей лампочки. И причина та же — и в лампочке, и в колбе давление гораздо ниже атмосферного, поэтому, кроме звона стекла, мы слышим громкий хлопок воздуха.

Если между стенками колбы находится не воздух, а вакуум, то, на первый взгляд, все понятно. Даже воздух довольно плохой проводник тепла — вспомните оконные рамы, — а уж в вакууме-то проводить тепло совсем нечему. (Есть еще один меха-

низм потери энергии горячим телом — излучение, и в чистом вакууме этот механизм не только основной, но и единственный, но мы от него отвлечемся и сосредоточимся на «эффекте термоса».) На самом деле в колбе находится не чистый, а так называемый технический вакуум, т.е. сильно разреженный, но все же воздух. Возникает вопрос — а насколько сильно надо этот воздух откачивать? Ведь чем выше требования к степени разреженности, тем труднее такую колбу сделать.

Постараемся ответить на этот вопрос, но прежде обсудим, как происходит

передача энергии от более горячей стенки к более холодной, если между ними находится разреженный воздух.

Молекулы воздуха, которые ударяются о горячую стенку, приобретают от молекул стенки избыточную энергию. В среднем энергия отлетающих от этой стенки молекул становится равной $\alpha k T_1$, где k — постоянная Больцмана, T_1 — абсолютная температура горячей стенки, а α — коэффициент порядка единицы (для оценок достаточно положить $\alpha = 1$). От холодной стенки молекулы отлетают со средней энергией $\alpha k T_2$, где T_2 — температура холодной стенки. Если бы о холодную стенку ударялись те самые молекулы, которые отлетают от горячей, то за единицу времени от горячей стенки к холодной передавалась бы энергия $\alpha k (T_2 - T_1) Z$, где Z — число молекул, ударяющихся о стенку за одну секунду.

Для оценки этого числа молекул будем для простоты считать, что все моле-

(Окончание см. на с. 34)

(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 ближайших, 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

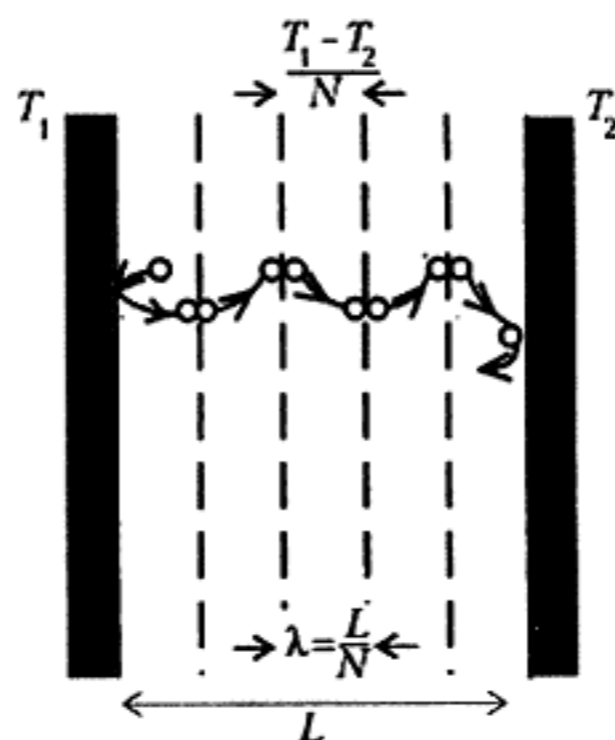


Рис. 1

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-

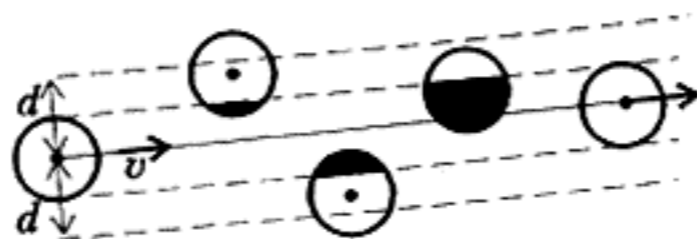


Рис. 2

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 $n(\pi d^2 v)$. 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 $\lambda = L$, то $n = 1/(\pi d^2 L)$. Пусть расстояние между стенками $L = 3$ мм, а диаметр молекул (из таблиц) $d = 3 \cdot 10^{-10}$ м. Тогда для температуры $T = 300$ К получим $p = nkT = 5$ 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?