

В чем ошибка Аристотеля

Аристотеля обычно вспоминают, чтобы покритиковать. И то у него неправильно, и это. Особенно достается ему в курсе механики. Ведь хорошо известно, что силе пропорционально ускорение тела, а тело, предоставленное само себе, движется с постоянной скоростью. А Аристотель утверждал нечто другое: скорость тела пропорциональна действующей на него силе. И если не прикладывать силы, то тело остановится. Правда, наш каждодневный опыт скорее подтверждает утверждение Аристотеля, чем Ньютона, два закона которого мы сформулировали выше. Действительно, чтобы тело двигалось, его надо толкать или тянуть, то есть прикладывать к нему силу, а как только приложенная сила исчезает, тело останавливается. Утверждение Аристотеля, на первый взгляд, лучше согласуется с наблюдаемыми явлениями, чем законы Ньютона. Поэтому-то так трудно было бороться с авторитетом Аристотеля.

Согласие между теорией (законами Ньютона) и экспериментом (наблюдениями за движущимися предметами) обнаруживается, если учесть силы трения. Когда, как казалось Аристотелю, на тело ничто не действует и поэтому (!) оно останавливается, на него в действительности действует сила трения, которая и тормозит движение.

Трение и атомы

Что же такое сила трения? Какова ее природа? Чаще всего мы вспоминаем о ней, изучая работу механизмов, задумываясь о скольжении

санок по снежному насту или лодки по водной поверхности. В общих чертах понять, что происходит при соприкосновении двух тел, пожалуй, можно. Их атомы (полозьев и снега или подшипника и обоймы) взаимодействуют друг с другом *). При движении атомы одного тела пытаются увлечь атомы другого. Если им удается это, то одно из них или оба разрушаются. Мы говорим обычно — стираются. Давайте, чтобы не затруднять рассмотрение, пренебрежем стиранием. При не очень больших скоростях и достаточно твердых деталях это вполне допустимо. Итак, атомам одного тела не удается увлечь атомы другого тела. Что же все-таки происходит? Атомы твердого тела (кристалла) располагаются в определенных позициях в положениях равновесия. Правда, термин «располагаются» несколько условен, так как атомы все время находятся в движении: они совершают малые колебания около положений равновесия. Интенсивность этих колебаний определяется температурой. Чем больше температура, тем больше энергия и амплитуда колебаний атомов. Атомы кристалла взаимодействуют друг с другом. Изменение движения одного ато-

*) Несколько туманное слово «взаимодействуют» означает, что атомы либо притягиваются друг к другу, либо отталкиваются. В действительности, и притягиваются, и отталкиваются. Вдали — притягиваются, а вблизи — отталкиваются. Надо только помнить, что масштабы в мире атомов — это ангстремы ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$). «Вдали» означает расстояние много больше 1 \AA , вблизи — порядка 1 \AA . При соприкосновении атомы разных тел находятся друг от друга на расстояниях, значительно превышающих 1 \AA .

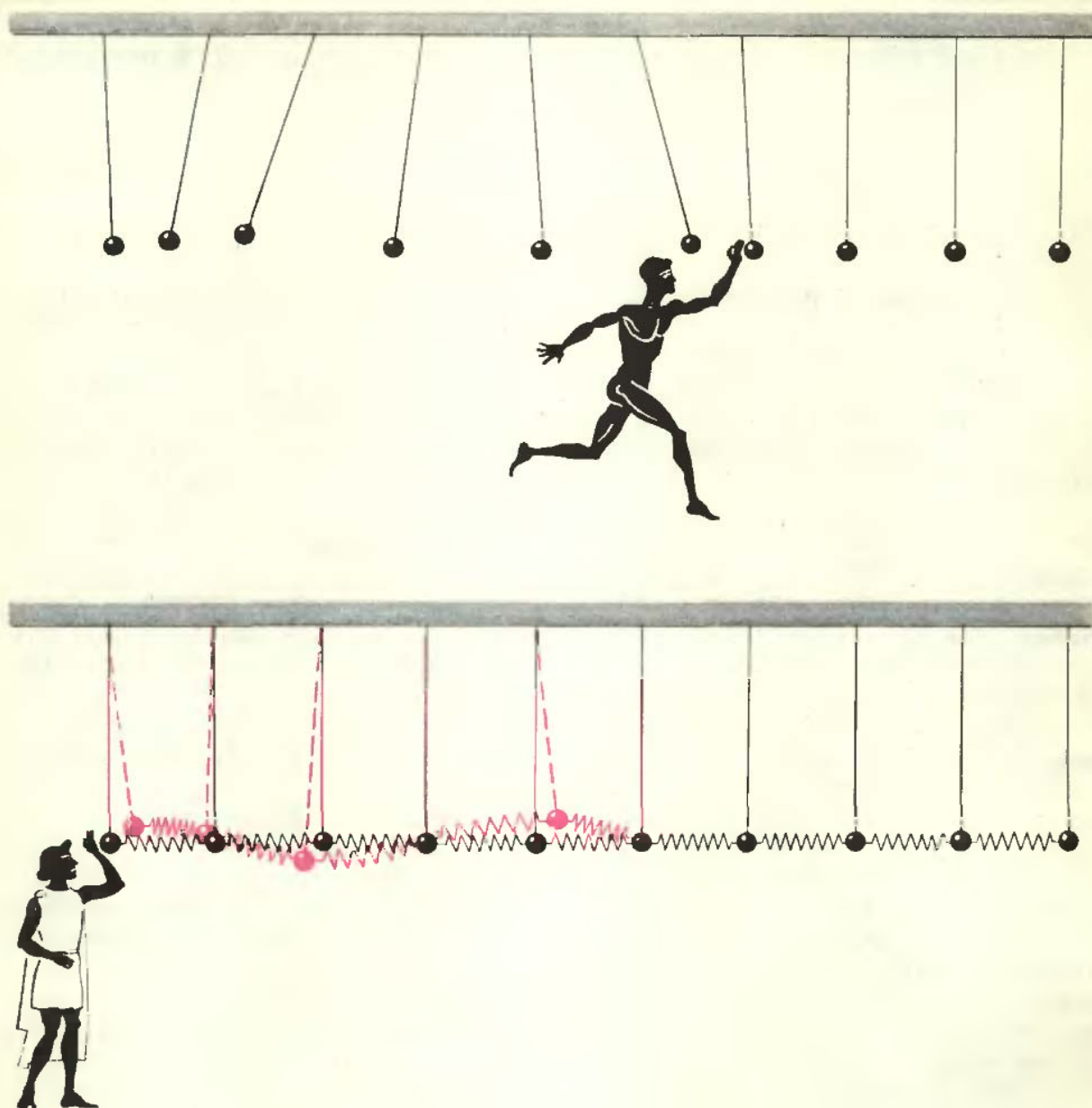


Рис. 1.

ма или группы атомов передается соседним...

Когда одно тело движется относительно другого, касаясь его, атомы этих тел «цепляют» и раскачивают друг друга. Если не бояться вульгаризации, то этот процесс можно представить себе так: человек бежит мимо висящих рядом маятников и раскачивает их. Или еще лучше: маятники связаны между собой. Качнув один или несколько, заставляют двигаться все остальные (рис. 1).

Колебания атомов, расположенных на поверхности тела, передаются атомам, расположенным в глубине. Передача энергии от поверхности в глубину тела — сложный процесс, не до конца прослеженный до сих пор (хотя общие черты его поняты). Пути передачи энергии существенно зависят от того, что представляет собой твердое тело. Например, в металлах энергию могут уносить электроны. Но, каков бы ни был путь отвода энергии от поверхности, в конечном

счете трение одного тела о другое приводит к повышению температуры. Кроме того, в процессе трения происходят изменения структуры трущихся поверхностей. Их необходимо учитывать при желании понять все явления, сопровождающие трение *). Однако, пока мы не пытаемся построить количественную теорию, нам не очень важно точно знать, что происходит в твердом теле. Существенно понять: энергия движущегося тела частично тратится на возбуждение движения атомных частиц, из которых состоят твердые тела.

Можно сказать, что трущиеся тела «работают», только работа эта делается впустую — энергия тратится на нагрев тела, которое чаще всего приходится искусственно охлаждать (человек каменного века, привыкший добывать огонь трением, не согласился бы с нами).

Чем больше взаимная скорость тел, тем больше энергии расходуется на раскачку атомов, значит, тем большую работу производят тела. С другой стороны, известно, что *работа в единицу времени (мощность) равна силе, умноженной на скорость*. Эта сила и есть *сила трения*.

Мы весьма формально «ввели» силу трения. Правда, попытались разъяснить ее природу.

Можно поступить и несколько иначе. Выяснить, какое количество импульса (количество движения) теряет движущееся тело в единицу времени на возбуждение колебаний атомов. Согласно закону Ньютона изменение импульса тела в единицу времени равно действующей на него силе. Это дает нам возможность определить силу трения. Конечно, оба определения приводят к одному и тому же значению силы.

Сила трения характеризует взаимодействие между макроскопическими телами, и, хотя трение — резуль-

тат взаимодействия отдельных атомных частиц, сила трения разительно отличается от сил, которые действуют между атомами и молекулами. Действительно, силы, действующие между атомами и молекулами, зависят только от расстояния между ними, а сила трения зависит от относительной скорости тел. Однако сила трения не только этим отличается от сил взаимодействия между микроскопическими телами. Она обладает свойством, называемым разными словами, смысл которых одинаков:

Необратимость, диссипация, потери

Под действием силы трения тело всегда теряет энергию, всегда тормозится. Это связано с тем, что энергия движения тел при трении расходуется на возбуждение движения атомных частиц. Атомов невообразимо много (10^{23} частиц в 1 см^3), движутся они беспорядочно. Переданная им энергия попросту рассеивается (диссипируется, от французского слова «dissipager» — рассеивать) между бесчисленными атомами. Новые хозяева энергии непрерывно обмениваются ею друг с другом и вовсе «не склонны отдать долг» макроскопическому телу. Описанный процесс есть, конечно, переход кинетической энергии в тепловую. Мы видим, что этот процесс необратим.

Плодотворный метод обобщения понятий состоит в том, что одно из основных свойств, присущее данному понятию, принимают за его новое определение. Воспользуемся этим методом для обобщения понятия трения. Важнейшее свойство трения, как мы видели, — это необратимость, связанная с переходом энергии упорядоченного движения в тепло. Примем это свойство за определение и отныне будем именовать трением всякий необратимый процесс, сопровождающийся переходом энергии упорядоченного движения в тепло. Теперь можно говорить о трении двух встречных потоков газа — они взаимно тормозятся и нагреваются, о

*) Проблемой трения заняты коллективы ученых, которым приходится привлекать самые современные методы исследования и последние представления о движении атомных частиц в твердых телах.

трении твердого тела о газ и т. д.

А сила трения? Она по-прежнему сопровождает процесс трения. В самом деле, в процессе трения энергия упорядоченного движения уменьшается, значит, уменьшается и его скорость. Иными словами, ускорение направлено в сторону, противоположную скорости тела.

Вспомним второй закон Ньютона. Где есть ускорение, там есть и сила. Эта сила и есть сила трения. Она направлена в сторону, противоположную скорости, она всегда тормозит...

Простой случай

Бывают случаи, когда расчет силы трения сравнительно прост и не требует глубокого проникновения в теорию твердого тела.

Пусть, например, твердое тело движется через достаточно разреженный газ. Тогда сила трения обусловлена столкновениями атомов газа с поверхностью тела.

Прежде чем приступить к расчету силы трения, рассмотрим отдельный акт столкновения. Частица с импульсом P падает на поверхность тела. Столкновение атома с поверхностью — сложное событие. Подумаем, что может произойти. Атом может остаться на поверхности (прилипнуть), может глубоко проникнуть в глубь тела, а может и отразиться от поверхности тела. При отражении (нас будет интересовать именно этот случай, мы дальше объясним почему) тоже возможны различные ситуации. Например, атом может ионизоваться или выбить атом с поверхности, молекула может распасться на составляющие ее атомы и так далее. Короче говоря, возможностей много, но будем считать, что атом просто отразился, как мяч от стенки. Не для упрощения, хотя эта ситуация действительно простейшая, а потому, что в подавляющем большинстве случаев при не слишком быстром движении тела через газ именно это и происходит — атомы просто отражаются (отскаки-

вают) от поверхности тела *). Более сложные ситуации (внедрение атомов в твердое тело, ионизация и др.), конечно, тоже наблюдаются и подробно исследованы. Каждый из этих процессов происходит с наибольшей вероятностью при определенной скорости частиц. Например, чем больше скорости частиц, тем больше вероятность того, что атом проникнет на сравнительно большую глубину в твердое тело. Чтобы представить себе, о каких скоростях идет речь, отметим: атом кислорода, налетающий на поверхность твердого тела со скоростью 10^7 см/сек**), проникает приблизительно на 10—12 атомных расстояний в глубину твердого тела. Средняя тепловая скорость v атомов газа с массой m , как показывает молекулярно-кинетическая теория газов, равна $\sqrt{\frac{kT}{m}}$,

где T — температура в абсолютных единицах, а k — так называемая постоянная Больцмана, равная $1,4 \cdot 10^{-23}$ дж/град. При $T = 300^\circ \text{ К}$ ($=27^\circ \text{ С}$) средняя скорость атома кислорода меньше 10^5 см/сек. Если тело покоится в газе, то средняя скорость столкновений молекул газа с поверхностью тела приблизительно совпадает со средней тепловой скоростью; если же тело движется, то отличается от нее. Однако в том случае, когда скорость движущегося тела мала по сравнению со средней тепловой скоростью (никогда не следует проходить мимо частных случаев, в которых исследуемый вопрос выглядит проще), скорость столкновения почти не отличается от тепловой, и энергии атома попросту недостаточно для проникновения вглубь твердого тела.

Хотя мы назвали случай отражения атомов от поверхности твердого тела простейшим, но и он нуждается в пояснении.

*) К счастью, очень редко молекулы воды из воздуха прилипают к летящему самолету. Иначе опасность оледенения возросла бы во много раз.

**) Кинетическая энергия атома кислорода при этом равна 10 кэв (см. ниже).

И атом, и тем более твердое тело — сложные системы, состоящие из большого числа частиц. При отражении атома от поверхности тела часть его энергии может уйти на то, чтобы несколько изменить внутреннее состояние атома или твердого тела, попросту говоря, сдвинуть частицы, из которых состоит атом и твердое тело. Если это произошло, то столкновение называется *неупругим*. Если же нет, то *упругим*. Каждое столкновение обладает некоторой неупругостью, но если часть энергии, ушедшая на изменение внутреннего состояния сталкивающихся объектов (атома, твердого тела), мала по сравнению с энергией атома, то неупругостью можно пренебречь и считать столкновение полностью упругим. Мы будем рассматривать именно такие столкновения.

Несколько слов о мяче

Может и должен возникнуть вопрос: «Почему неупругость мала?» Ответить на него непросто. Разберем несколько подробнее отскок мяча от стенки или, что проще, от пола. Если столкновение упруго, то мяч, начавший движение с нулевой скоростью, после удара об пол подпрыгнет на высоту, с которой упал (трением о воздух пренебрегаем). Если столкновение неупруго, то мяч не долетит до начальной высоты. Опыт показывает, что твердый, хорошо надутый мяч прыгает хорошо, а мягкий — плохо. И что от деревянного пола мяч отскакивает хорошо, а от песка — плохо. Все определяется тем, легко или трудно сдвинуть молекулы или атомы, из которых состоят сталкивающиеся тела (мяч, пол), относительно друг друга. Если легко (ненадутый мяч, отскок от песка), то соударение неупруго, если трудно, то — упруго. Казалось бы, что должно быть иначе. Если трудно сдвинуть, то на это тратится большая часть энергии, если легко, то меньшая. Тогда было бы наоборот: мягкий мяч подпрыгивал бы на большую высоту, чем твердый. Хотя непосредственное

наблюдение отвергает эту возможность имеет смысл проверить себя расчетом.

Законы сохранения и неравенства

Рассмотрим столкновение двух элементарных частиц в том случае, когда одна из них гораздо тяжелее другой. Называя частицу элементарной, мы утверждаем, что внутреннее движение в частице отсутствует или не играет никакой роли в изучаемом явлении. Так, Землю можно было бы считать элементарной частицей при изучении движения Луны, если бы не приливы и отливы, «отсасывающие» ее энергию. Жесткий, хорошо надутый мяч выступает в процессе столкновения как элементарная частица, а слабо надутый — как сложное тело.

Пусть тяжелая частица массы M до столкновения покоится. Обозначим через $p = mv$ импульс легкой частицы до столкновения. Для оценки импульсов и энергий частиц после столкновения воспользуемся законами сохранения энергии и импульса.

Ясно, что в результате столкновения кинетическая энергия тяжелой частицы может только увеличиться (напомним, что до столкновения она равнялась нулю). Так как полная энергия не изменяется, то кинетическая энергия легкой частицы после столкновения уменьшается, а вместе с ней уменьшается скорость v легкой частицы и величина ее импульса. Поэтому изменение импульса легкой частицы $\Delta p = p' - p$ не превосходит $2mv$.

Применим теперь закон сохранения импульса. Он утверждает, что изменения импульсов Δp и ΔP легкой и тяжелой частиц равны по величине и противоположны по направлению: $\Delta p = -\Delta P$.

С другой стороны, так как тяжелая частица до столкновения покоилась, то $\Delta p = \Delta P = MV'$ (V' — скорость тяжелой частицы после столкновения). Поэтому

$$V' \leq \frac{2m}{M}v$$

и

$$\frac{MV'^2}{2} \leq \frac{2m^2}{M} v^2 = \frac{4m}{M} \frac{mv^2}{2}.$$

Это означает, что

$$\frac{MV'^2}{2} / \frac{mv^2}{2} \leq 4 \frac{m}{M}.$$

Итак, отношение энергии, переданной тяжелой частице, к первоначальной энергии легкой частицы не может превысить значения $4 \frac{m}{M}$. Чем тяжелее тело, с которым сталкивается частица, тем меньше переданная энергия, тем ближе столкновение к упругому.

При столкновении с телом большой массы переданная ему энергия очень мала. Но ведь масса — мера инерции. Тело большой массы трудно сдвинуть*). Таким образом при столкновении с телом, которое трудно сдвинуть, передается малая доля энергии. Подтвердилось наше наблюдение над отскоком мяча.

Прочитав внимательно последние абзацы, можно убедиться, что, отказавшись от точных соотношений — равенств, мы смогли почти без труда получить существенные сведения о процессе столкновения.

Твердое тело с точки зрения атома

Теперь вернемся к столкновению атома с твердым телом. Прежде всего постараемся понять, почему атом ведет себя как надутый (жесткий, упругий) мяч, а не как мягкий, слабо надутый. Хорошо известно, что электроны в атоме находятся в определенных фиксированных (чаще говорят, дискретных) состояниях, каждому из которых соответствует определенная фиксированная энергия.

Но это означает, что для того, чтобы изменить внутреннее состояние атома (перевести электроны или хотя бы один электрон из одного состояния в



Рис. 2.

другое), нужно затратить энергию, равную разности энергий конечного и начального состояний (рис. 2). Если кинетическая энергия $E_{\text{кин}}$ атома газа гораздо меньше, чем разность энергий двух электронных состояний в атоме, т. е. если

$$E_{\text{кин}} \leq \Delta E,$$

то атом отражается упруго, ему попросту не хватает энергии для возбуждения своих электронов и приходится вести себя как элементарная частица*). Как же обстоит дело в действительности? Обратимся к цифрам. Различие энергии ΔE между возбужденным состоянием и основным составляет несколько электрон-вольт. Когда речь идет о тепловых свойствах тел, энергию теплового движения атомов принято измерять в градусах Кельвина**). Различие энергии между возбужденным состоянием и основным составляет в градусном выражении примерно 10^5 °К. В то же время температура земных газов, конечно, значительно меньше 10^5 °К. Наша догадка подтвердилась — все дело в соотношении энергий.

*) Если вы зайдете в магазин, в котором стоимость самого дешевого предмета превышает сумму, имеющуюся в ваших карманах, то «столкновение» с магазином произойдет «упруго» — с чем зашел, с тем и вышел.

**) $1^\circ \text{K} = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} = 0,87 \cdot 10^4 \text{ эВ}$.

*) Одна и та же сила, приложенная к телам с разной массой, придает им ускорения, обратно пропорциональные массам.

Мы рассмотрели вопрос с точки зрения состояния атома, но ведь атом может потратить часть энергии на возбуждение движения в твердом теле. Что касается возбуждения электронов внутри атомов, составляющих твердое тело, то к ним полностью относится только что проведенное рассуждение: не хватает энергии. Но атом может качнуть атом (или атомы) твердого тела — заставить его колебаться. Однако надо помнить, что атомы в твердом теле связаны друг с другом (об этом мы говорили вначале). Один атом сдвинуть нельзя, можно возбудить в теле коллективное движение атомов, т. е., другими словами, возбудить звуковую волну. Этот процесс и есть главная причина неупругости столкновения атомов с твердым телом, если атомы падают на поверхность тела с не слишком большими скоростями. Однако, как показывает расчет, изменение энергии атома при этом мало. В данном случае твердое тело при взаимодействии с атомом «выступает» как макроскопическая система — «тяжелая на подъем», а как мы убедились выше, это обстоятельство обеспечивает упругость столкновений.

Приведенные выше, конечно, очень приближенные рассуждения позволяют оценить, до каких скоростей атомов можно считать столкновения упругими. Пока падающий атом «воспринимает» твердое тело как целое, изменение энергии практически отсутствует — изменяется только направление импульса, а когда его энергии хватает на то, чтобы выбить атом твердого тела из его равновесного положения или возбудить электроны внутри себя или в атомах твердого тела, тогда столкновение существенно неупруго.

Так как потенциальная энергия взаимодействия атомов (или молекул) в твердом теле в расчете на одну частицу, как правило, меньше, чем энергия возбуждения электронов в атоме, то критическая скорость $v_{кр}$ (скорость, выше которой столкновение заведомо нельзя считать упругим)

определяется энергией связи. Но энергия связи атомов в твердом теле равна (очень грубо) кинетической энергии молекул при температуре плавления.

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT_{пл}$$

Поэтому

$$v_{кр} \approx \sqrt{\frac{kT_{пл}}{m}},$$

где m — масса атома, сталкивающегося с твердым телом.

Может показаться, что нас сильно «увело» в сторону, что мы забыли, о чем ведем разговор — о природе сил трения. Это не так. Длинный разговор о столкновениях атома с твердым телом нам нужен, во-первых, для того, чтобы объяснить именно силу трения. Но, пожалуй, не менее важно и «во-вторых». Во-вторых, этот разговор нужен для того, чтобы показать сложность физических явлений, даже привычных, даже, казалось бы, совершенно элементарных. Можно было, конечно, просто сказать, что атом упруго (мы теперь понимаем, что означает этот термин) отражается от поверхности твердого тела. Но тогда из поля зрения выпала бы сложность взаимодействия атома с поверхностью твердого тела. И, пожалуй, главное: слишком упрощенное представление может привести к ошибкам. Например, если тело движется через газ с очень большой скоростью, то соответственно велика и скорость столкновения атомов с его поверхностью. Тут уже не учитывать неупругость нельзя.

Правда, к оценке «очень большой» надо подходить осторожно. Например, реактивный самолет, летящий с огромной сверхзвуковой скоростью через атмосферу, с точки зрения столкновений надо считать летящим медленно. Разнообразные сложности, возникающие при сверхзвуковом полете, обусловлены отнюдь не характером столкновений молекул воздуха с самолетом, а макроскопическими причинами — именно тем обстоятельством, что самолет летит быстрее звука, перегоняя звуковые волны, которые он возбуждает в воздухе... Вот те-

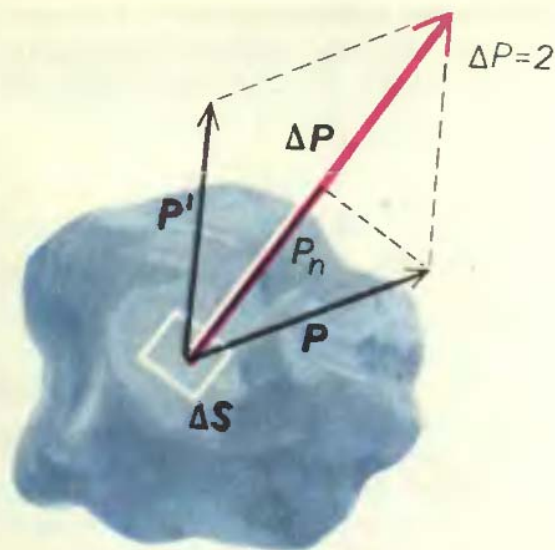


Рис. 3.

перь мы действительно отошли в сторону от интересующего нас предмета.

Чему же равна сила трения?

Итак, вернемся к расчету силы трения, действующей на тело, движущееся с относительно малой скоростью u через разреженный газ, температура которого T . Удобно считать тело покоящимся, а газ движущимся со скоростью $-u$. Выделим на поверхности тела бесконечно малую площадку *) ΔS (рис. 3). Импульс молекулы газа, столкнувшейся упруго с телом в точке на выделенной площадке, изменится на $2P_n$, где P_n — проекция импульса молекулы на нормаль к поверхности тела. Это означает, что молекула газа при столкновении с телом отдает ему импульс, равный $2P_n$. Теперь наша задача — подсчитать полный импульс, передаваемый газом телу в единицу времени. Изменение импульса в единицу времени и есть сила (в данном случае действующая со стороны газа на тело). Для вычисления полного передаваемого импульса надо, во-первых, учесть все молекулы, падающие в единицу времени на данную площадку, и во-вторых, просуммировать по всем площадкам.

*) См. по поводу «бесконечно малой площадки» статью Н. Я. Виленкина «Тайны бесконечности» («Квант» № 3, 1970).

Подобная операция проделывалась в статье Я. А. Смородинского «Идеальный газ» («Квант» №10). Здесь мы воспользуемся готовыми результатами. Давление газа на покоящуюся стенку равно $\frac{1}{3} nmv^2$, где n — число молекул газа в единице объема, m — масса молекулы и v^2 — среднее арифметическое от квадратов скоростей молекул. Если тело покоится ($u = 0$), число ударов справа и слева в среднем одинаково, и поэтому телу никакой импульс не передается. При $u \neq 0$ это не так. Пусть тело движется. В этом случае скорость молекул, налетающих спереди, на u больше, а скорость молекул, налетающих сзади, на u меньше. Поэтому на участок ΔS движущейся плоскости действует сила

$$F = (P_{\text{спереди}} - P_{\text{сзади}}) \Delta S = \\ = \frac{1}{3} nm \Delta S [(v+u)^2 - (v-u)^2] = \\ = \frac{2}{3} nm u v \Delta S.$$

Вспоминая, что $v = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$ (см. статью «Идеальный газ»), получим

$$F = \frac{2}{3} n \sqrt{3kTm} u \Delta S.$$

Для тела произвольной формы мы должны получить формулу

$$F = \beta S n \sqrt{mkT} u.$$

Здесь S — площадь поверхности тела, а β — численный коэффициент, зависящий от формы тела. Он учитывает, что на одни участки молекулы попадают перпендикулярно к поверхности, а на другие — под углом.

Если воспользоваться законом Клапейрона $PV = NkT$ ($N = nV$ — полное число частиц газа в объеме V), то можно выразить силу трения через давление P и температуру T газа:

$$F_{\text{тр}} = \beta S P \sqrt{\frac{m}{kT}} u.$$

Получился естественный результат: при фиксированных температуре и

скорости тела сила трения тем больше, чем больше давление газа.

Вязкость газов

Мы довольно подробно описали, почему при движении тела через газ на него действует сила — сила трения — результат ударов отдельных молекул о поверхность движущегося тела. При этом мы совершенно не интересовались тем, что происходит с газом, с его молекулами после столкновения. Задумаемся ненадолго о судьбе молекул, столкнувшихся с телом. Ясно, что если бы мы имели возможность измерить скорость всех столкнувшихся с телом молекул, то убедились бы, что средняя скорость их не равна нулю. Молекулы пусть незначительно, но увлекаются движущимся телом. А если измерить скорость молекул вдали от тела, то (в отсутствие ветра, конечно) их средняя скорость равна нулю. Чуть-чуть другими словами: вблизи поверхности движущегося тела имеется упорядоченное движение газа, а вдали от тела его нет. С упорядоченным движением связан некоторый импульс. Слой газа вблизи поверхности тела называют пограничным слоем. Молекулы в пограничном слое чаще сталкиваются с движущимся телом, чем остальные молекулы газа. Из-за этого их средний импульс должен был бы возрасти, если бы не было процесса отвода импульса из пограничного слоя.

Понять этот процесс легко. Молекулы газа, улетающие из пограничного слоя, просто уносят с собой излишек импульса. Вдали от тела они «разбазаривают» его в многократных столкновениях с другими молекулами или в столкновениях с покоящимися телами.

Способность газа переносить импульс из одного места в другое и, главное, необратимо растрачивать его носит название вязкости. Вязкость и трение неразлучны. Вязкость — интересное явление, в котором главную роль играют столкновения между молекулами. Мы ими вовсе пренебрегли при вычислении силы трения, действующей на движущееся тело со стороны газа.

Мы при этом ошиблись. Но как? Преувеличили или занизили силу трения? Легко понять, что преувеличили. Действительно, мы считали, что молекула, столкнувшись с телом, больше никогда к нему не вернется и, следовательно, не будет иметь возможности «вернуть» телу полученный у него импульс. В действительности, если тщательно проследить за многими молекулами, столкнувшимися с телом, то мы убедимся, что часть из них возвращается к телу (после столкновения с какой-либо из молекул газа), другие отдают приобретенный от тела излишек импульса своим партнерам по столкновениям, а те в свою очередь могут столкнуться с телом. Строго говоря, в результате столкновений молекул друг с другом происходит частичный возврат импульса телу, а значит, тело теряет меньше импульса, чем мы считали.

Выведенная здесь формула применима только к очень разреженным газам, у которых среднее расстояние между столкновениями молекул значительно больше размеров тела. Если вычислять силу трения, действующую на пылинки с размерами, не превосходящими нескольких микрон, под категорию разреженных газов может подойти и наш воздух.