



№ 1, 2002 г. / Школа в “Кванте”

И. Слободецкий

СУХОЕ ТРЕНИЕ

А. Стасенко

КОСТРЫ В ПОЛЕ И РУССКАЯ БАНЯ СВИСТ ПОЕЗДА И СВЕТ ГАЛАКТИК

© “Квант”

Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 00-07-90172)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Физика 9—11

Публикуемая ниже заметка «Сухое трение» предназначена девятиклассникам, заметка «Костры в поле и русская баня» — десятиклассникам и «Свист поезда и свет галактик» — одиннадцатиклассникам.

Сухое трение

И. СЛОБОДЕЦКИЙ

ПОЧЕМУ ПРИ РЕЗКОМ ТОРМОЖЕНИИ АВТОМОБИЛЬ заносит? Почему скрипит плохо смазанная дверь? Почему движущийся равномерно смычок заставляет звучать скрипичную струну? Все это объясняется свойствами сил трения, о которых и пойдет речь в этой статье.

С трением мы сталкиваемся на каждом шагу. Вернее было бы сказать, что без трения мы и шагу ступить не можем. Но несмотря на ту большую роль, которую играет трение в нашей жизни, до сих пор не создана достаточно полная картина возникновения трения. Это связано даже не с тем, что трение имеет сложную природу, а скорее с тем, что опыты с трением очень чувствительны к обработке поверхности и поэтому трудно воспроизводимы.

Вот пример. Английский физик Гарди исследовал зависимость силы трения между стеклянными пластинками от температуры. Он тщательно обрабатывал пластинки хлорной известью и обмывал их водой, удаляя жиры и загрязнения. Трение увеличивалось с температурой. Опыт был повторен много раз, и каждый раз получались примерно одни и те же результаты. Но однажды, моя пластинки, Гарди протер их пальцами — трение перестало зависеть от температуры. Протерев пластинки, Гарди, как он сам считал, удалил с них очень тонкий слой стекла, изменивший свои свойства из-за взаимодействия с хлоркой и водой.

Когда говорят о трении, различают три несколько различных физических явления: сопротивление при движении тела в жидкости или газе — его называют жидким трением; сопротивление, возникающее, когда тело скользит по какой-нибудь поверхности, — трение скольжения, или сухое трение; сопротивление, возникающее при качении тела, — трение качения. Эта статья посвящена сухому трению.

Первые исследования трения, о которых мы знаем, были проведены Леонардо да Винчи примерно 500 лет назад. Он измерял силу трения, действующую на деревянные параллелепипеды, скользящие по доске, причем, ставя бруски на разные грани, определял зависимость силы трения от площади опоры. Но работы Леонардо да Винчи стали известны уже после того, как классические законы трения были вновь открыты французскими учеными Амонтоном и Кулоном в 17—18 веках. Вот эти законы:

1) Величина силы трения F прямо пропорциональна величине силы нормального давления N тела на поверхность, по которой движется тело, т.е. $F = \mu N$, где μ — безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом трения.

2) Сила трения не зависит от площади контакта между поверхностями.

3) Коэффициент трения зависит от свойств трущихся поверхностей.

4) Сила трения не зависит от скорости движения тела.

Триста лет дальнейших исследований трения подтвердили правильность трех первых законов, предложенных Амонтоном и Кулоном. Неверным оказался лишь последний — четвертый. Но это стало ясно много позже, когда появились железные дороги и машинисты заметили, что при торможении состав ведет себя не так, как предсказывали инженеры.

Амонтон и Кулон объясняли происхождение трения довольно просто. Обе поверхности неровные — они покрыты небольшими горбами и впадинами. При движении выступы цепляются друг за друга, и поэтому тело все время поднимается и опускается. Для того чтобы втащить тело на «холм», к нему нужно приложить определенную силу. Если выступ больше, то и сила нужна побольше. Но это объяснение противоречит одному очень существенному явлению: на преодоление трения тратится энергия. Так, кубик, скользящий по горизонтальной поверхности, рано или поздно останавливается. А поднимаясь и опускаясь, тело не тратит своей энергии. Или вспомните аттракцион «Американские горки». Когда санки скатываются с горки, их потенциальная энергия переходит в кинетическую, и скорость санок возрастает, а когда санки въезжают на новую возвышенность, кинетическая энергия, наоборот, переходит в потенциальную. Энергия санок уменьшается за счет трения, но не из-за подъемов и спусков. Аналогично обстоит дело и при движении одного тела по поверхности другого. Здесь потери энергии на трение также не могут быть связаны с тем, что выступы одного тела «взбираются» на бугры другого.

Есть еще возражения. Например, простые опыты по измерению силы трения между полированными стеклянными пластинками показали, что при улучшении полировки поверхности сила трения сначала не меняется, а затем возрастает, а не убывает, как следовало бы ожидать на основании модели явления, предложенной Амонтоном и Кулоном.

Механизм трения значительно более сложен. Обсудим такую модель. Из-за неровностей поверхностей они касаются друг друга только в отдельных точках на вершинах выступов. Здесь молекулы соприкасающихся тел подходят на расстояния, соизмеримые с расстоянием между молекулами в самих телах, и сцепляются. Образуется прочная связь, которая рвется при нажиме на тело. При движении тела связи постоянно возникают и рвутся. При этом возникают колебания молекул. На эти колебания и тратится энергия.

Площадь действительного контакта обычно порядка тысяч квадратных микронов. Она практически не зависит от размеров тела и определяется природой поверхностей, их обработкой, температурой и силой нормального давления. Если на тело надавить, то выступы сминаются, и площадь действительного контакта увеличивается. Увеличивается и сила трения.

При значительной шероховатости поверхностей большую роль в увеличении силы трения начинает играть механическое зацепление между «холмами». Они при движении сминаются, и при этом тоже возникают колебания молекул.

Теперь понятен опыт с полированными стеклянными пластинками. Пока поверхности были «грубые», число контактов было невелико, а после хорошей полировки оно возросло. Можно привести еще пример увеличения трения с улучшением поверхности. Если взять два металлических

бруска с чистыми полированными поверхностями, то они слипаются. Трение здесь становится очень большим, так как площадь действительного контакта велика. Силы молекулярного сцепления, которые ответственны за трение, превращают два бруска в монолит.

Рассмотренная нами модель трения довольно груба. Мы не останавливались здесь на диффузии молекул, т.е. на проникновении молекул одного тела в другое, на роли электрических зарядов, возникающих на соприкасающихся поверхностях, на механизме действия смазки. Эти вопросы во многом неясны, а объяснения спорны. Можно только удивляться тому, что при такой сложности трение описывается столь простым законом: $F = \mu N$. И хотя коэффициент трения μ не очень постоянен и несколько меняется от одной точки поверхности к другой, для многих поверхностей, с которыми мы часто сталкиваемся в технике, можно делать достаточно хорошие оценки ожидаемой силы трения.

Сухое трение имеет одну существенную особенность: наличие трения покоя. В жидкости или газе трение возникает только при движении тела, и тело можно сдвинуть, приложив к нему даже очень маленькую силу. Однако при сухом трении тело начинает двигаться только тогда, когда проекция приложенной к нему силы $\vec{F}$ на плоскость, касательную к поверхности, на которой лежит тело, станет больше некоторой величины (рис. 1).

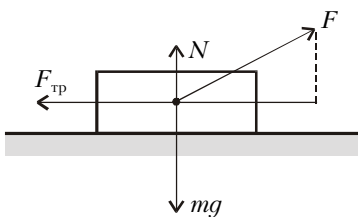


Рис. 1

Пока тело не начало скользить, действующая на него сила трения равна касательной составляющей приложенной силы и направлена в противоположную сторону. При увеличении приложенной силы сила трения тоже

возрастает, пока не достигает максимальной величины, равной μN , при которой начинается скольжение. Дальше сила трения уже не меняется.

Часто об этом забывают при решении задач. На вопрос, какая сила трения действует на стол массой 30 кг, стоящий на полу, если коэффициент трения равен 0,4, большинство уверенно отвечает: 120 Н, что неверно. Сила трения равна нулю – иначе стол поехал бы в сторону действия силы трения, так как других горизонтальных сил нет.

Итак, если тело покоится, то, для того чтобы сдвинуть его с места, к телу нужно приложить силу, большую максимальной возможной силы трения покоя, которая обусловлена прочностью молекулярных связей. А как обстоит дело, если тело уже движется? Какую силу нужно приложить для того, чтобы тело начало двигаться еще и в другом направлении? Оказывается, сколь угодно малую. Связано это как раз с тем, что сила трения не может быть больше максимальной силы трения покоя.

Попробуйте проделать простой опыт. Возьмите книжку и положите ее одним краем на другую книжку потолще. Получится наклонная плоскость. Теперь положите на эту плоскость спичечный коробок, к которому привязана нитка. Если коробок скользит, то уменьшите наклон плоскости, взяв книжку-подставку потоньше. Потяните за нитку коробок вбок. При этом он поедет еще и вниз! Уменьшите наклон плоскости и опять потяните за нитку. Та же картина. Коробок соскальзывает даже при очень малых углах наклона плоскости. Сила трения, раньше удерживавшая коробок на плоскости, стала почему-то очень маленькой.

Постараемся понять, в чем здесь дело. Если бы коробок двигался только горизонтально, то параллельно ребру на-

клонной плоскости на него действовала бы сила трения, равная μN . Для того чтобы коробок при этом не соскальзывал вниз, вверх на него должна действовать сила трения, равная по величине проекции силы тяжести коробка на наклонную плоскость. Равнодействующая этих двух сил трения больше μN , а этого быть не может. Значит, коробок должен соскальзывать с наклонной плоскости.

Теперь представим себе такую ситуацию. Возьмем брусок, привяжем к нему нить и, положив брусок на горизонтальную плоскость, будем тянуть за нить с постоянной скоростью v_1 (рис. 2). Приложив к бруску силу, перпендикулярную $\vec{v}_1$, его можно заставить двигаться еще и в этом направлении с постоянной скоростью $\vec{v}_2$.

Сила трения при этом будет равна μN и направлена противоположно скорости $\vec{v}$ движения бруска относительно плоскости ($\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$).

Разложим силу трения на две составляющие – по направлению скоростей $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$:

$$F_1 = F_{\text{тр}} \cos \beta, \quad F_2 = F_{\text{тр}} \sin \beta,$$

где β – угол между векторами $\vec{v}_1$ и $\vec{v}$, а $\tan \beta = v_2/v_1$. Составляющая $\vec{F}_1$ силы трения уравнивает силу натяжения нити, а составляющая $\vec{F}_2$ – «боковую» силу, приложенную к бруску. Так как

$$\sin \beta = \frac{\tan \beta}{\sqrt{1 + \tan^2 \beta}},$$

то

$$F_2 = F_{\text{тр}} \frac{v_2/v_1}{\sqrt{1 + (v_2/v_1)^2}} = F_{\text{тр}} \frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}.$$

Если $v_2 \ll v_1$, то угол β мал и $\sin \beta \approx \tan \beta$. В этом случае

$$F_2 = F_{\text{тр}} \tan \beta = \mu N \frac{v_2}{v_1},$$

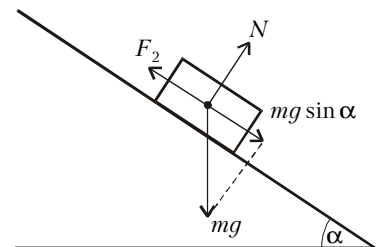
и составляющая силы трения, препятствующая движению бруска «вбок», оказывается пропорциональной скорости этого движения. Картина получается такой, как при малых скоростях в случае жидкого трения. А это означает, что брусок, движущийся в некотором направлении, можно заставить двигаться еще и в перпендикулярном направлении сколь угодно малой силой.

Любопытный вывод можно теперь сделать относительно коробка, равномерно движущегося по наклонной плоскости (рис. 3). Здесь $F_2 = mg \sin \alpha$, а $N = mg \cos \alpha$ (m – масса коробка, α – угол наклона плоскости к горизонту). Поэтому

$$\begin{aligned} mg \sin \alpha &= \\ &= \mu mg \cos \alpha \frac{v_2}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}, \end{aligned}$$

откуда

$$v_2 = v_1 \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\mu^2 - \tan^2 \alpha}}.$$



Это справедливо, конеч-

Рис. 3

но, лишь при $\operatorname{tg} \alpha < \mu$, так как при больших углах наклона плоскости к горизонту коробок уже не удерживается на плоскости силой трения. При малых углах наклона плоскости к горизонту (таких, что $\operatorname{tg} \alpha \ll \mu$)

$$v_2 = v_1 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\mu},$$

т.е. скорость соскальзывания коробка пропорциональна скорости его движения параллельно ребру наклонной плоскости и тангенсу угла наклона плоскости к горизонту.

Явление, о котором шла речь, встречается довольно часто. Например, известно, что при резком торможении электродвигателя ремень передачи часто соскальзывает со шкивов. Происходит это потому, что при торможении двигателя ремень начинает проскальзывать относительно шкивов, и достаточно небольшой силы, чтобы сдвинуть ремень вбок. Так как обычно имеется небольшой перекося в установке шкивов и ремня, то такой силой является составляющая силы натяжения ремня.

Вот еще примеры. Когда хотят вытащить гвоздь из стенки без помощи клещей, его ггибают и тащат, поворачивая одновременно вокруг оси. По той же причине при резком торможении автомобиль теряет управление и машину «заносит»: колеса скользят по дороге, а за счет неровностей дороги возникает боковая сила.

Остановимся теперь на последнем законе Амонтона – Кулона: сила трения не зависит от скорости тела. Это не совсем так.

Вопрос о зависимости силы трения от скорости имеет очень важное практическое значение. И хотя эксперименты здесь связаны со многими специфическими трудностями, они окупаются использованием полученных сведений – например, в теории резания металлов, в расчетах движения пули и снарядов в стволе и т.д.

Обычно считают, что, для того чтобы сдвинуть тело с места, к нему нужно приложить большую силу, чем для того, чтобы тащить тело. В большинстве случаев это связано с загрязненными поверхностями трущихся тел. Так, для чистых металлов такого скачка силы трения не наблюдается. Опыты с движением пули в стволе показали, что с увеличением скорости пули величина силы трения сначала быстро убывает, потом она уменьшается все медленнее, а затем (при скоростях больше 100 м/с) начинает возрастать. График

зависимости силы трения от скорости показан на рисунке 4. Грубо это можно объяснить тем, что в месте контакта выделяется много тепла. При скоростях порядка 100 м/с температура в месте контакта может достигать нескольких тысяч градусов, и между поверхностями образуется слой расплавленного металла – трение становится жидким. А при больших скоростях сила жидкого трения пропорциональна квадрату скорости.

Рис. 4

Интересно, что примерно такую же зависимость от скорости имеет сила трения смычка о струну. Именно поэтому мы можем слушать игру на смычковых инструментах – скрипке, виолончели, альте.

При равномерном движении смычка струна увлекается им и натягивается. Вместе с натяжением струны увеличивается сила трения между смычком и струной. Когда величина силы трения становится максимально возможной, струна начинает проскальзывать относительно смычка. Если бы сила трения не зависела от относительной скорости смычка и струны, то, очевидно, отклонение струны от положения равновесия не изменялось бы. Но при проскальзывании трение уменьшается, поэтому струна начинает двигаться к положению равновесия. При этом относительная скорость струны увеличивается, а это еще уменьшает силу трения. Когда же струна, совершив колебание, движется в обратном направлении, ее скорость относительно смычка уменьшается, смычок опять захватывает струну, и все повторяется сначала. Так возбуждаются колебания струны. Эти колебания незатухающие, поскольку энергия, потерянная струной при ее движении, каждый раз восполняется работой силы трения, подтягивающей струну до положения, при котором струна срывается.

Этим можно и закончить статью о сухом трении – явлении, природу которого мы еще не понимаем достаточно хорошо, но умеем описывать с помощью законов, выполняющихся с удовлетворительной точностью. Это дает нам возможность объяснять многие физические явления и делать необходимые расчеты.

Костры в поле и русская баня

А. СТАСЕНКО

*Только окутает ночь всю землю росистой влагою,
Как остывает земля и смыкается сразу плотнее;
И потому из себя, как бы сжатая чьей-то рукою,
Весь свой запас семян огневых выжимает в источник,
Делая влагу его испарений горячей на ощупь.*

Лукреций

КОГДА ПРИХОДИТ ОСЕНЬ С ЕЕ НОЧНЫМИ ЗАМОРОЗКАМИ, а урожай еще не убран, в полях и садах с вечера

жгут дымные костры. Зачем? Неужто для того, чтобы за счет тепловыделения согреть воздух? Но, как известно, теплый воздух поднимается вверх – что же в таком случае достанется овощам и фруктам? Явно причина такого преднамеренного задымления в чем-то другом. И это другое связано с *фазовыми превращениями*.

Каждый знает (или может легко убедиться), что для испарения воды нужно затрачивать определенную энергию (чайник ставят на печь), а при конденсации пара ту же энергию нужно отводить (для чего делают охлаждаемые змеевики). Далее, известно, что с повышением температуры растет количество водяного пара, который может содержаться в воздухе (в тропических лесах «душно», а в зимние морозы «дышится легко»), – иначе говоря, с ростом температуры растет давление насыщенного пара. Используя физические таблицы, можно построить график этой зависимости. На рисунке 1 приведены соответствующие кривые для воды и для основных компонентов воздуха – азота и кислорода.

(Продолжение см. на с. 34)

(Начало см. на с. 31)

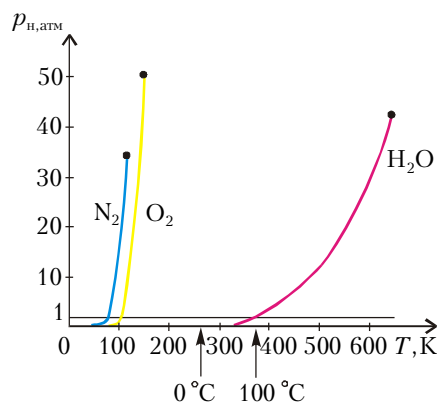


Рис. 1

Особенно отмечен температурный интервал от 0 до 100 °C, в котором существует жидкая вода при нормальном давлении в 1 атмосферу. Уже из самого вида этих кривых понятно, почему воздух не конденсируется «при нормальном давлении» — для этого понадобилось бы сильное охлаждение.

А почему вообще молекулы воды «хотят» сконденсироваться, а молекулы воздуха — «не хотят» (и слава Богу)? Это можно объяснить, например, при помощи графика потенциальной энергии Φ взаимодействия двух молекул, находящихся на расстоянии r друг от друга (рис. 2; здесь k — постоянная Больцмана). Если это расстояние велико ($r \rightarrow \infty$),

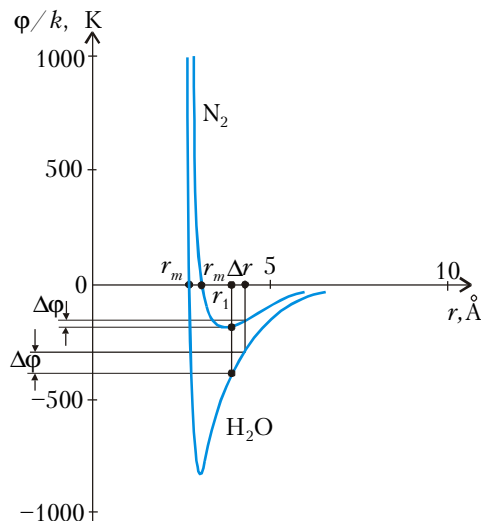


Рис. 2

то энергия взаимодействия почти ноль — молекулы «не чувствуют» друг друга. Но по мере сближения (r уменьшается) молекулы попадают на склон графика (например, в точку r_1) и, как санки с горы, устремляются в потенциальную «яму», где Φ минимально. (Вспомним, что в поле тяготения Земли каждый предмет тоже старается занять положение с наименьшей потенциальной энергией — в этом можно убедиться, например, слегка столкнув карандаш со стола на стул, а со стула — на пол.)

Ту же мысль можно выразить в терминах сил взаимодействия. Известно, что чем круче гора, тем быстрее мчатся санки. Значит, сила взаимодействия (санок с Землей или молекул друг с другом) зависит от крутизны склона, а эту крутизну можно охарактеризовать быстротой изменения потенциала при изменении расстояния:

$$F = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta r}.$$

Здесь знак «минус» указывает, что сила направлена в сторону дна «ямы». Чем больше наклон кривой $\Phi(r)$, тем больше сила взаимодействия. Теперь понятно, что глубина

потенциальной «ямы» тесно связана с удельной теплотой испарения (фазового перехода) L , а именно: $\Phi_{\min} \sim L$. Кстати, теперь в качестве масштаба силы можно ввести отношение глубины потенциальной ямы к характерному размеру молекулы r_m :

$$F \sim \frac{|\Phi_{\min}|}{r_m} \sim \frac{L}{r_m}.$$

Найдя в справочниках значения L и r_m , сравним силы, действующие между парой молекул воды и парой молекул азота:

$$\frac{F_{\text{H}_2\text{O}}}{F_{\text{N}_2}} \sim \frac{L_{\text{H}_2\text{O}}}{L_{\text{N}_2}} \frac{r_{m\text{N}_2}}{r_{m\text{H}_2\text{O}}} \sim \frac{2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}}{0,2 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}} \frac{3,8 \text{ Å}}{2,6 \text{ Å}} \sim 20.$$

Можно сказать, что молекулы воды «любят друг друга» в двадцать раз сильнее, чем молекулы азота.

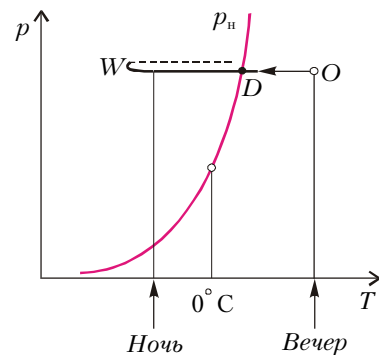
Итак, в принципе все молекулы жаждут объединиться. Что же им мешает? Их кинетическая энергия. Ведь на дне «ямы» они будут иметь большую скорость — как камень, сброшенный с крыши, имеет максимальную скорость у земли. Тут нужен третий участник процесса — кто-то должен унести эту кинетическую энергию, чтобы пара молекул осталась рядом друг с другом. Конечно, это должна быть третья молекула. Но для того чтобы начался процесс образования *зародышей конденсации*, газ должен стать довольно холодным — чтобы его молекулы двигались достаточно медленно, успевали сблизиться и отдавать третьему участнику избыток энергии. Какой энергии? Конечно же, теплоты конденсации!

Вот тут-то мы и подошли к кострам в поле.

Расчет теплообмена подогретой воздушной массы с землей и остальной атмосферой — сложная метеорологическая задача. (Всплывающий теплый пузырь, называемый термиком, уносит тепло костра вверх, что нам совершенно ни к чему.) Мы для определенности предположим, что нагретый костром воздух охлаждается изобарически, т.е. давление остается постоянным. Значит, с падением температуры (например, за счет теплового излучения или теплоотвода в почву) растет плотность смеси воздуха с парами воды. В координатах p, T этот процесс (рис. 3) изображается горизонтальной линией ODW , где точка O — начальное состояние (вечер, перед заморозками). Если пар не конденсируется, то в процессе охлаждения изобара пересечет кривую насыщения в «точке росы» D , затем уйдет левее, в область пересыщения ($p > p_n$), и, если отношение p/p_n станет значительным, жидкость начнет выпадать в виде микрокапель с выделением тепла. Точка W называется точкой Вильсона (того самого, который разработал «туманную камеру» для регистрации треков элементарных частиц на порожденных ими ионах в пересыщенном паре).

Но этот процесс спонтанной (самопроизвольной) конденсации может начаться при слишком низких температурах, недопустимых для живых растений. Вот тут-то и приходят на помощь частички дыма. Они предоставляют свою поверхность для «посадки» на нее молекул воды, отводят избыточную теплоту конденсации, а затем отдают ее другим молекулам, соударяющимся с частицей. Теперь,

Рис. 3



в отличие от спонтанной конденсации, эта *гетерогенная конденсация* происходит без пересыщения пара. Система воздух – пар как бы застревает в точке росы D .

Пора сделать количественные оценки.

Если концентрация частичек сажи (их количество в единице объема) n , а массовая плотность пара $\rho_{\text{п}}$, и если весь водяной пар сконденсируется на этих частичках, то масса каждой капельки будет

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{п}}}{n},$$

где a – радиус капельки, $\rho_{\text{в}}$ – плотность жидкой воды. Следовательно, радиус капельки равен

$$a = \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{4\pi \rho_{\text{в}} n/3} \right)^{1/3}.$$

Конечно, тут предполагается, что все капельки одинаковы.

Выше мы обозначили через L удельную теплоту испарения. Теперь оценим приращение температуры воздуха ΔT вследствие конденсации всего пара: $c_p \rho_{\text{воз}} \Delta T \sim \rho_{\text{п}} L$, где c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $\rho_{\text{воз}}$ – плотность воздуха, откуда

$$\Delta T \sim \frac{\rho_{\text{п}} L}{c_p \rho_{\text{воз}}}.$$

Известно, что $L \sim 2,5$ МДж/кг, $c_p \sim 1$ кДж/(кг·К), $\rho_{\text{воз}} \sim 1$ кг/м³. Если принять, что к вечеру количество пара в воздухе составляет $\rho_{\text{п}} \sim 1$ г/м³, а концентрация частичек сажи от костра порядка $n \sim 10^{11}$ м⁻³, то

$$a \sim \left(\frac{10^{-3}}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^3 \cdot 10^{11}/3} \right)^{1/3} \text{ м} \sim 10^{-6} \text{ м} = 1 \text{ мкм}$$

и

$$\Delta T \sim \frac{10^{-3} \cdot 2,5 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 1} \text{ К} = 2,5 \text{ К}.$$

Это уже кое-что: тепло, выделившееся при конденсации водяного пара на твердых частичках, порожденных кострами, позволяет на несколько градусов отдалиться от точки замерзания воды, опасной для растений.

Но при чем здесь русская баня? А при том, что в ней имеется отделение, которое прямо так и называется: *парная*. Там водяной пар конденсируется на теле купальщика, которое представляется очень холодной поверхностью в сильно нагретом воздухе. Именно выделяющееся тепло конденсации и обжигает тело, что и доставляет удовольствие знатокам этого дела. Так что, пребывая в бане, думайте о термодинамике!

Свист поезда и свет галактик

А. СТАСЕНКО

*...всегда до ушей достигают
Медленней звуки, чем то, что дает впечатления глазу.
В этом нетрудно тебе убедиться: коль издали смотрим,
Как дровосек топором двусторонним деревья срубает,
Видим мы раньше удар, а потом уже звук раздается
В наших ушах. Потому мы и молнию видим сначала,
Прежде чем слышится гром...*

Лукреций

И ТАК, УЖЕ ДРЕВНИЕ ФИЗИКИ-ФИЛОСОФЫ ЗНАЛИ, что звук движется медленнее света, во всяком случае, что скорость звука конечна (т.е. ограничена по величине). Но что любопытно: ни один ученый древности не отмечает еще одно явление, связанное с распространением волн, а именно изменение высоты звука при перемещении его источника относительно слушателя. В нашу эпоху этот факт, известный как *эффект Доплера*, регистрируется и используется в случае не только звуковых волн, но и электромагнитных тоже. Однако рассмотрим все по порядку: сначала акустику, затем оптику.

Пусть источник звука неподвижен, а приемник движется к нему со скоростью v (рис.1,а). Если в данный момент времени расстояние между источником и приемником x , то на нем уместилось бы число волн $N = x/\lambda = xv/c$, где λ – длина волны, излучаемой источником, v – частота излучения, c – скорость звука. Но пока приемник доберется до источника, пройдет дополнительное время $\Delta t = x/v$, и за это

время источник излучит еще $\Delta N = v \Delta t$ волн. Итого, приемник зарегистрирует $N + \Delta N$ колебаний, что равносильно частоте

$$v' = \frac{N + \Delta N}{\Delta t} = \frac{xv/c + vx/v}{x/v} = v \left(1 + \frac{v}{c} \right).$$

Перепишем эту зависимость в безразмерном виде:

$$\frac{v'}{v} = 1 + \frac{v}{c}. \quad (1)$$

Теперь поменяем местами приемник и источник звука (рис.1,б). Пусть приемник звука неподвижен, а источник

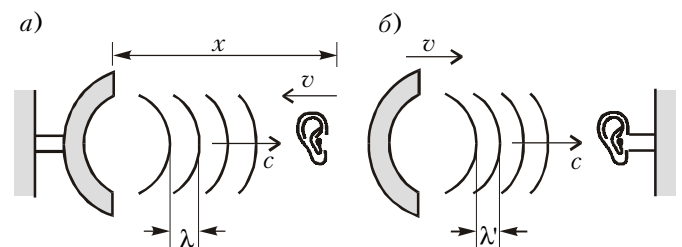


Рис. 1

движется к нему со скоростью v . При этом длина волны в неподвижном воздухе уменьшается:

$$\lambda' = \lambda \frac{c - v}{c},$$

где λ – длина волны в случае неподвижного источника (при $v = 0$). (Отсюда, видно, например, что при $v = c$ получим $\lambda' = 0$: «хвост» волны догоняет ее «голову».) Тогда неподвижный приемник будет «слышать» звуковую волну λ' , которой соответствует частота

$$v' = \frac{c}{\lambda'} = v \frac{c}{c - v}.$$

Или в безразмерном виде:

$$\frac{v'}{v} = \frac{1}{1 - v/c}. \quad (2)$$

На рисунке 2 изображены графики, соответствующие выражениям (2) и (1). Отметим характерные особенности кривых AB и ED .

При $v/c = 0$ (источник и приемник неподвижны относительно воздуха) частота звука не искажается: $v' = v$. При

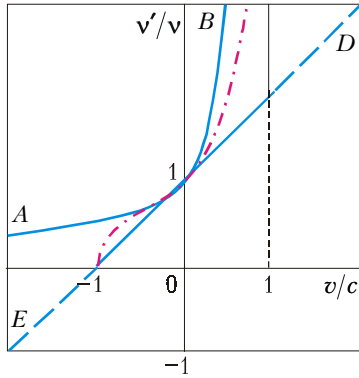


Рис. 2

$v/c \rightarrow 1$ (кривая $1B$) источник все быстрее налетает на приемник, частота звука растет: бас, издаваемый источником, воспринимается как коварный писк, при еще больших скоростях становится ультразвуком, а при $v \geq c$ уже не достигает источника – невозможно, например, услышать сверхзвуковой самолет, пока он не долетит до приемника лично.

Если же v/c становится

отрицательной величиной, т.е. источник звука удаляется от приемника (кривая $A1$), воспринимаемый звук оказывается ниже испускаемого.

В случае приближения приемника к источнику звука частота принимаемого звука растет (участок $1D$), в случае удаления – падает, причем в этом последнем случае улетающий приемник будет обгонять волны в обратном порядке (см. штриховой участок прямой $1E$ при $v/c < -1$). Конечно, в окрестностях точек $v/c = \pm 1$ должно происходить еще что-то интересное – ведь в воздухе перед приемником может возникнуть скачок уплотнения, который должны будут преодолевать звуковые волны прежде чем попасть в регистрирующий их приемник, так что потребуются уточнение теории. Ибо в этом скачке все параметры газа (давление, температура и плотность) отличаются от атмосферных.

Посмотрим, как на деле «работают» полученные формулы. Пусть по мосту через пропасть между двумя участками туннеля движется поезд (рис.3) со скоростью v , а его свисток излучает звук частотой v . Прежде всего, согласно формулам (1) и (2), неподвижные наблюдатели Антон (A) и Борис (B) будут воспринимать звуки с частотами $v_{A1} = v/(1 - v/c)$ и $v_{B1} = v(1 - v/c)$. Эти три частоты изображены на рисунке 3 вверху в виде отрезков, высота которых качественно

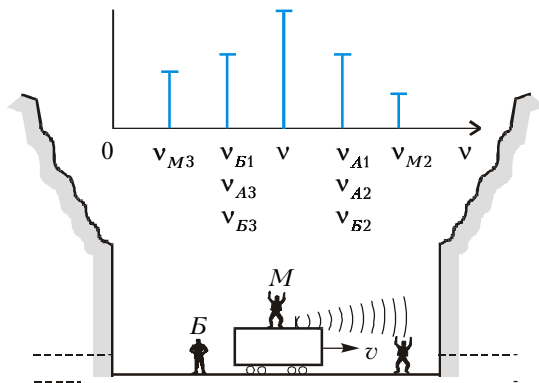


Рис. 3

характеризует интенсивность звука. Ясно, что для наблюдателей A и B эта интенсивность меньше, чем для машинистки Маши (M) – просто оттого, что звуковые «лучи» расходятся во все стороны. Дойдя до стенок туннеля (предполагаем, что они вертикальны), звуковые волны отражаются, и их, в принципе, могут зарегистрировать все три наблюдателя. Волны, отраженные от правой стенки, придут к A , B и M с частотами $v_{A2} = v_{A1}$, $v_{B2} = v_{B1}$ и $v_{M2} = v(1 + v/c)/(1 - v/c)$, потому что эта правая стенка служит как бы излучателем звука частотой $v_{A1} = v/(1 - v/c)$. Левая стенка служит излучателем звука частотой $v_{B1} = v(1 - v/c)$ и снабжает неподвижных слушателей звуками той же частоты: $v_{A3} = v_{B1}$, $v_{B3} = v_{B1}$, а удаляющийся от этой стенки наблюдатель M услышит звук частотой $v_{M3} = v(1 - v/c)/(1 + v/c)$.

Учитывая многократные отражения свистка паровоза от вертикальных стенок туннеля, вдумчивый читатель может самостоятельно обогатить палитру звуков, воспринимаемых тремя наблюдателями.

Выше уже было упомянуто, что частота принимаемого звука совпадает с частотой излучаемого ($v' = v$), только если приемник и источник неподвижны *относительно воздуха*; подчеркнем здесь еще раз – именно относительно воздуха, а не *относительно друг друга*. Действительно, если, например, источник движется за приемником вправо и оба они движутся со скоростью звука (следовательно, их относительная скорость равна нулю), то излучаемый звук никогда не достигнет приемника – где уж тут говорить о неискаженной частоте! Это происходит потому, что звуковые волны распространяются в материальной среде, обладающей инертностью (и упругостью). В этом случае важно подчеркивать, что движется относительно среды – приемник или излучатель волн, поэтому выше и получились различные формулы для принимаемой частоты.

Другое дело – оптика. Тут определяющую роль играет именно относительная скорость V приемника и источника. Не вдаваясь в тонкости преобразований Лоренца, приведем окончательный результат:

$$\frac{v'}{v} = \frac{1 \pm V/c}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}. \quad (3)$$

Здесь знак «плюс» соответствует случаю сближения приемника и излучателя электромагнитных волн, «минус» – удаления их друг от друга, c – теперь уже скорость света (а не звука), а для относительной скорости специально использована другая буква, а именно V (а не v), чтобы еще раз подчеркнуть отличие оптики от акустики.

Соответствующая выражению (3) кривая изображена на рисунке 2 штрих-пунктиром (тут-то и видна польза безразмерных переменных: и оптика и акустика уместились на одном графике, хотя масштабы скоростей распространения световых и звуковых волн отличаются в миллион раз). Видно, в частности, что, если скорости v или V малы (по сравнению со своим «масштабом» c), то формулы для относительного сдвига частот звуковых и электромагнитных волн одинаковы:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{v' - v}{v} \approx \frac{v}{c} \quad \text{или} \quad \frac{V}{c}. \quad (4)$$

Эта приближенная формула является самой простой оценкой *доплеровского сдвига* частот, причем как в акустике, так и в оптике. Теперь ясно, например, что из-за вращения Солнца один край его диаметра (движущийся к нам) должен быть синее, а другой (удаляющийся от нас) – краснее, чем центр его диска. И если мы обладаем достаточно чувствительным

измерителем разности частот, то при помощи формулы (4) мы найдем линейную (окружную) скорость и, следовательно, скорость вращения звезды.

Тут уместно вспомнить анекдотичный случай с одним Физиком, автомобиль которого остановил Полисмен за движение на красный свет. Физик объяснил, что при сближении со светофором красный свет кажется зеленым. Зная характерные длины волн для этих участков спектра ($\lambda_{\text{кр}} \approx 0,65$ мкм, $\lambda_{\text{зел}} \approx 0,55$ мкм), по формуле (3) можно рассчитать или по формуле (4) оценить эту скорость сближения – она более ста миллионов километров в час! Поэтому Полисмен все-таки оштрафовал Физика – за превышение скорости в городе. (Полисмен всегда прав.)

Эффект Доплера сыграл большую роль в космологии. Астрономические наблюдения показали, что чем дальше находится галактика, тем больше ее излучение сдвинуто в красную сторону спектра («красное смещение») и, значит, тем быстрее она удаляется от нас: $v = Hr$. Это выражение получило имя *закона Хаббла*, а коэффициент пропорцио-

нальности H – постоянной Хаббла. Картина похожа на разлет осколков при сильном взрыве. Так появилось понятие Большого Взрыва – исходной точки нашей Вселенной. В настоящее время постоянная Хаббла принимается равной приблизительно 50 км/с на миллион парсеков. Поскольку 1 парсек $\approx 3 \cdot 10^{13}$ км, то $H \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ с}^{-1}$. Обратная H величина не случайна – это время: $1/H = \tau_H \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ с} \approx \approx 20$ млрд. лет. И оно имеет определенное отношение к возрасту Вселенной, а будучи умноженным на скорость света, дает оценку современного размера Вселенной: $R \sim t_H c \sim 10^{26} \text{ м}$.

Так эффект Доплера позволил добраться до самого начала Мира. Почему же древние физики умалчивают о нем (хотя они ближе к Большому Взрыву). Конечно, не только потому, что Доплер тогда еще не родился. По-видимому, это связано с тем, что в то время не было достаточно больших скоростей передвижения, которые позволили бы обнаружить этот эффект. А с лошади что возьмешь?..