

О поющих проводах или сюрпризы металлической пружины

А.С. Сергеев, Н.Г. Жданова, И.А. Сергачев, Р.Ф. Стрюнгис, А.П. Пятаков

Окружающее нас пространство наполнено самыми разными звуками. Некоторые из них мы слушаем с интересом и вниманием, например, голоса собеседников, сводки новостей, любимую музыку. Другие же звуки мы стараемся пропускать мимо ушей, в то время как многие из них заслуживают внимания и, более того, даже могут стать предметом научного исследования.

Всем вам наверняка приходилось стоять рядом с железнодорожными путями и слышать гудение локомотива, грохот товарного состава или скрежет колёс тормозящей электрички. Эти грубые, громкие звуки составляют привычную какофонию железной дороги и вызывают скорее неприятные ощущения, чем любопытство исследователя. В то же время, вблизи путей вы можете услышать звуки, которые трудно назвать иначе как удивительными. В напряженной тишине, предшествующей приходу очередного поезда, прислушайтесь к звукам от проводов, по которым скользят токоприёмники электропоездов. Эти звуки не будут иметь ничего общего с щелчками или другими привычными звуками ударов. Вы услышите звонкое «чириканье», состоящее из многих звуков одиночных ударов, каждый из которых, если задаться целью изобразить его буквами на письме, лучше всего передается сочетанием «тиу». Важно отметить, что звуки подобного рода возникают не только при соударениях проводов. Вы можете услышать такой звук, если кто-то ударит по рельсу на расстоянии нескольких сот метров от вас. Сходные звуки порождают удары лёгких камушков о тонкий лёд осенью, когда пруды только начинают покрываться ледяной пленкой.

Попробуем внимательнее приглядеться ко всем этим явлениям: когда они возникают, какие общие закономерности имеют? Во всех случаях причиной служит удар, звук которого, если слушать его в непосредственной близости, мало напоминает мелодичный звук «тиу». Но по мере того как мы удаляемся от места удара, звук становится музыкально «окрашенным»: чем дальше, тем ярче и отчётливее. Специалисты в акустике скажут нам, что удар порождает волну изгиба в проводе, рельсе, слое льда

(рис.1), а характерное звучание «тиу» объясняется волновым явлением, называемым *дисперсией*.

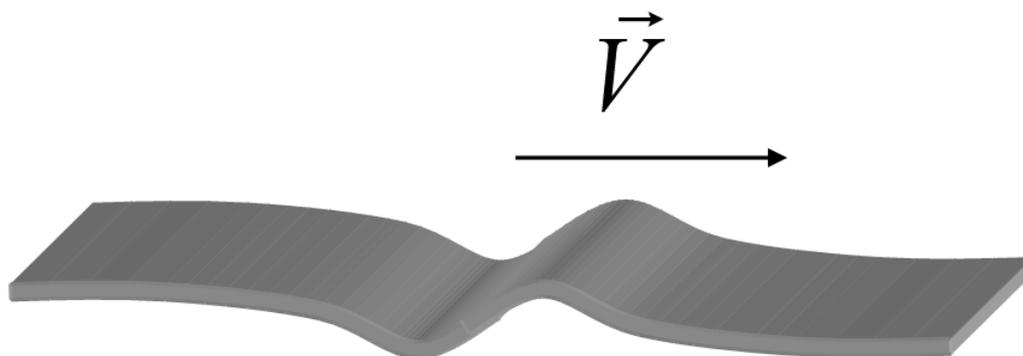


Рис. 1 Изгибная волна

Говорят, что среда распространения волн обладает дисперсией, если скорость волны в этой среде зависит от её частоты. Широко известным примером дисперсии электромагнитных волн является разложение призмой белого света в спектр. В состав белого света входят волны различных частот, то есть свет разных цветов. Из-за дисперсии волны разного цвета имеют разную скорость, и, следовательно, преломляются стеклом призмы по-разному. Так на экране появляется радуга – спектр белого света. С точки зрения физики, радужная полоса на экране представляет собой плавное изменение частоты света с изменением координаты. Если бы люди могли «видеть» звуки, наш звук «тиу» смотрелся бы точно так же: в нём также происходит постепенное уменьшение частоты звука с течением времени. Но возможна ли в принципе дисперсия звуковых волн? При распространении звука в воздухе в зависимости от расстояния до источника может меняться лишь его громкость, но никак не характер звучания. Легко представить, во что превратился бы, например, фортепианный концерт, обладай воздух дисперсионными свойствами: высокие ноты имели бы большую скорость распространения, чем низкие, и уже для слушателей, сидящих в середине партера, музыка превратилась бы в неузнаваемую мешанину звуков. Возникает противоречие: с одной стороны, звук «тиу» очень похож на проявление дисперсии, а с другой повседневный опыт говорит нам, что дисперсии звуковых волн нет. Ключ к разгадке кроется в том, что наши объекты не являются неограниченными однородными средами, как воздух, а обладают специфической формой. У всех этих объектов хотя бы один размер много больше других, и хотя бы один много меньше длины изгибной волны. Такие, протяжённые, объекты

являются *волноводами*, то есть каналами, по которым могут распространяться волны. Акустические волноводы отличаются от неограниченных сред наличием необычных явлений и интересных закономерностей распространения упругих волн. Дисперсия – одно из таких явлений. Удар возбуждает множество колебаний разных частот, и по волноводу начинает распространяться группа волн. Дисперсия проявляется в том, что волны высоких частот перемещаются быстрее, чем волны низких. Это приводит к тому, что на большом расстоянии волны низких частот значительно отстают от волн с высокими частотами, и звук удара «растягивается», превращаясь в знакомый нам звук «тиу».

Таково качественное объяснение явления, но нам хотелось разобраться в нем более детально, измерив количественные соотношения. Легко понять, что проведение натуральных экспериментов (т.е. в естественных условиях, не в лаборатории) весьма затруднительно: по рельсам постоянно следуют поезда; провода, как правило, находятся под высоким напряжением, а выбор тонкого льда означает привязку к редким погодным условиям. Хотелось бы иметь протяжённое твёрдое тело, которое легко помещалось бы в любой комнате. Казалось бы, это – противоречие, неисполнимая прихоть исследователя, но такой объект существует.

Знакомьтесь: металлическая пружина-«слинки»! Недеформированная, она легко помещается в руке, а для работы достаточно растянуть её на полтора метра (Рис. 2). Но самое важное, что суммарная длина витков составляет восемнадцать метров. Таким образом, пружина обладает компактностью и, в то же время, большой длиной волновода, необходимой для наблюдения дисперсии.



Рис. 2 Слинки

В сечении лента, из которой скручена пружина, представляет собой прямоугольник $1.6 \times 0.5 \text{ мм}^2$ (рис.3). Его ширина и высота, а также радиус витка пружины являются тремя основными геометрическими параметрами пружины. Расстояние между витками, то есть степень растяжения пружины, не оказывает заметного влияния на её звучание. Кстати, о звучании: думаю, вы уже догадались, что при ударе по одному концу пружины на другом её конце слышится знакомое нам «тиу», но здесь оно принимает особый оттенок, и напоминает звук, с которым стреляют из лазерного оружия герои фантастических фильмов.

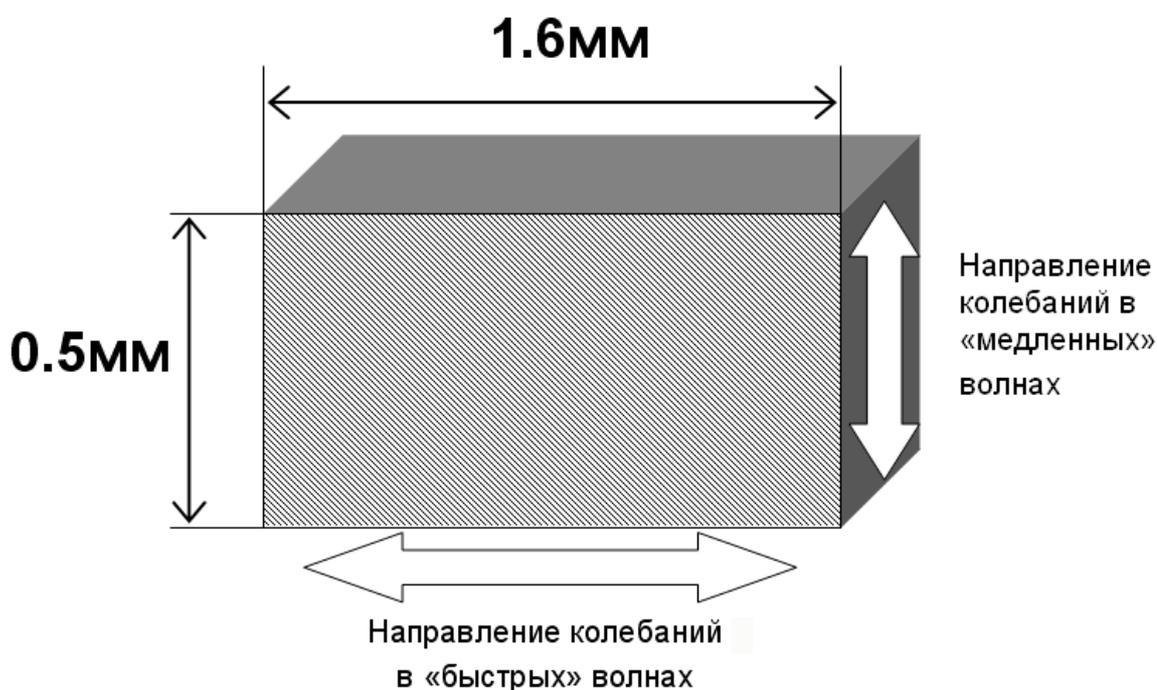


Рис. 3 Сечение металлической ленты, из которой сделана пружина

Приступим теперь к исследованиям. В первую очередь, необходимо как-то усилить звук, поскольку изгибная волна, дойдя до конца пружины, плохо излучается в воздух. В музыкальных инструментах для усиления звучания струн используют резонаторы и деки (большие пластины-излучатели). Мы будем действовать по похожему принципу: попробуем жёстко связать с концом пружины какое-то твёрдое тело с относительно большой площадью поверхности. Возможно, вы удивитесь, но лучше всего для этого подходит обыкновенный кусок пенопласта. Достаточно воткнуть в него конец пружины, и громкость звука многократно увеличится. Нам удалось увеличить интенсивность звука, и теперь его можно изучать с помощью компьютера. Для этого установим напротив

пенопласта микрофон и запишем звук на компьютер. С помощью специальной программы (в нашем это была Cool Edit Pro) можно отобразить звук графически – в виде спектрограммы. Спектрограмма – это диаграмма, по вертикальной оси которой откладывается частота, а по горизонтальной – время, цветом изображается громкость звука. Обычный вид спектрограммы звуков пружины показан на рисунке 4. Каждая кривая на этом графике отображает один звук «тиу». Форма кривой наглядно демонстрирует характерный переход от высоких частот к низким. Очень похожими кривыми изображается звук от проводов и тонкого льда. Многообразие же волн в пружине является кажущимся: только три из них непосредственно вызваны ударом, а остальные представляют собой лишь многократные отражения трёх основных.

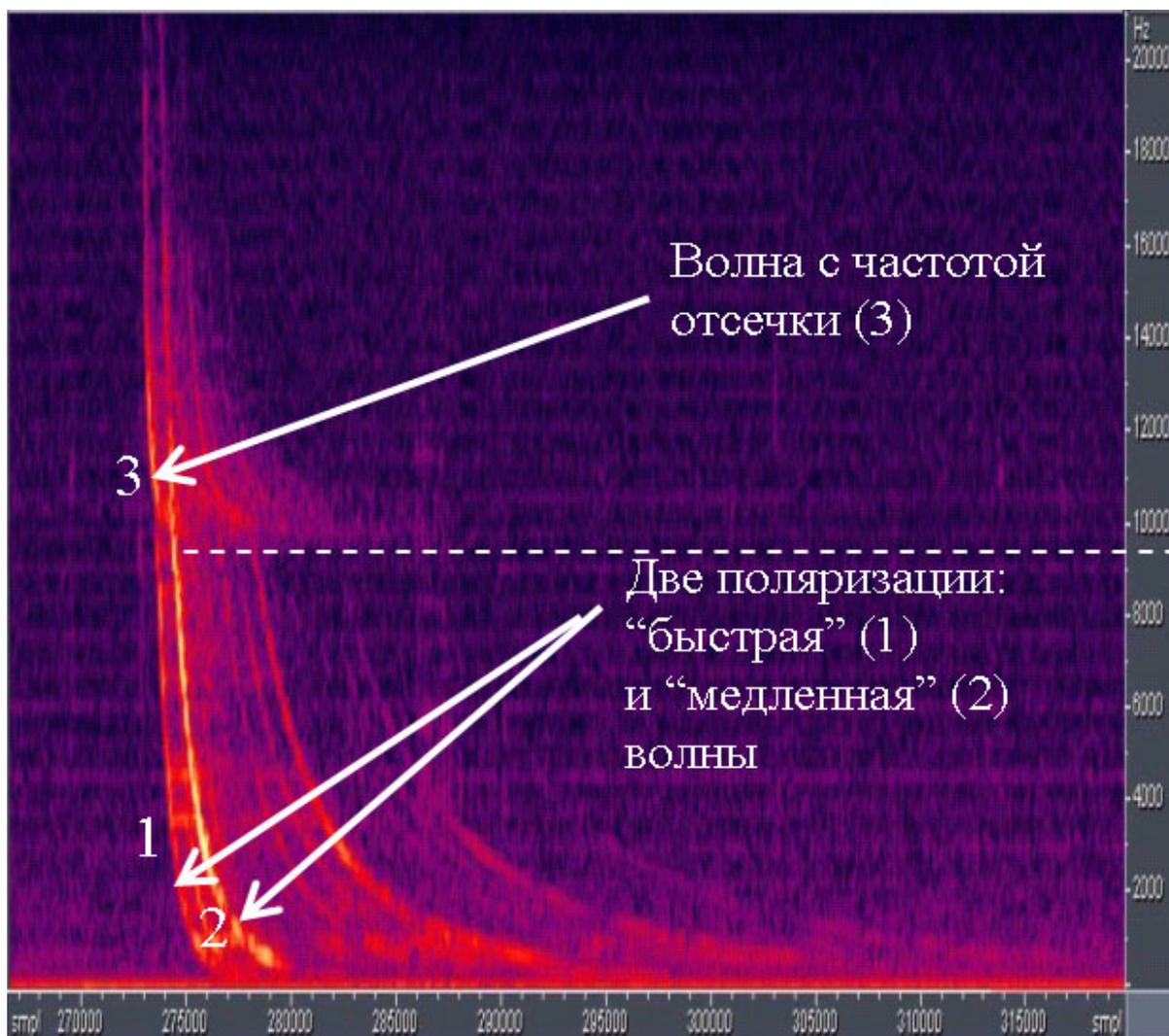


Рис. 4 Спектрограмма (диаграмма звука в осях время – частота). Наибольшей громкости соответствуют наиболее светлый из цветов (желтый)

Рассмотрим поведение основных кривых на спектрограмме. Две из них стремятся к нулю, а третья – к некоторой постоянной частоте. Давайте вспомним о трёх геометрических размерах пружины: двух длинах сторон сечения и радиусе витков. А что, если кривые на спектрограмме как-то соответствуют геометрическим размерам? Смелое предположение нетрудно проверить. Возбуждая колебания в пружине, можно ударять по какой-то одной стороне прямоугольного сечения; тогда на полученных спектрограммах соответствующая кривая будет ярче, то есть амплитуда соответствующей волны – больше. Говорят, что эти волны обладают взаимно перпендикулярной поляризацией, т.е. колебания в них совершаются в взаимно перпендикулярных направлениях (см. рис.3, направления колебаний показаны двойными стрелками).

Измерим теперь скорости этих волн. По определению дисперсии, каждой частоте соответствует своя скорость распространения, поэтому выберем для определения скорости конкретную частоту, равную 3 кГц. Зная пройденный путь и время, протекшее от момента удара, найдём скорости обеих волн: 460 м/с для «быстрой» и 255 м/с для «медленной». Между скоростями волн и длинами сторон сечения должна существовать простая количественная связь: интуитивно понятно, что чем больше толщина пластины, тем она жёстче (сильнее сопротивляется изгибу), и тем быстрее бежит вдоль него изгибная волна. Более детальное рассмотрение, проведенное в учебниках по механике сплошных сред, показывает, что скорость изгибной волны пропорциональна корню из толщины пластины. Значит, также должны относиться скорости для двух поляризованных перпендикулярно друг другу изгибных волн, возникающих при ударе по разным сторонам сечения. Измерив длины сторон сечения, можно убедиться, что отношение скоростей равно квадратному корню из соответствующего отношения длин:

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{1.6\text{мм}}{0.5\text{мм}}} \approx 1.8.$$

Таким образом, существование «быстрой» и «медленной» волн объясняется прямоугольной формой сечения ленты, а соответствие между ними и размерами поперечного сечения установлено экспериментально и согласуется с теорией.

Рассмотрим третью кривую (рис.4), которая, в отличие от первых двух, стремится не к нулю, а к некоторой константе. Это означает, что область частот, на которых могут распространяться волны такого типа, ограничена снизу некой ненулевой частотой (в данном случае около 9 кГц). Эта ненулевая частота, показана пунктирной линией,

которая как бы отсекает для волн область низких частот. Такие волны называют *волнами с частотой отсечки*.

Мы предположили, что существование волн с частотой отсечки как-то связано с третьим геометрическим параметром – радиусом пружины. Для того чтобы подтвердить догадку, мы раздобыли несколько пружин из точно такой же ленты, но разных радиусов. Результаты измерений частот отсечки для пружин трех различных радиусов представлены в таблице:

Радиус пружины, мм	Частота отсечки, кГц
37	7
30	8.7
28	9.3

Можно заметить, что произведение частоты отсечки и радиуса примерно одинаково для всех пружин:

$$\nu_1 R_1 = \nu_2 R_2 = \nu_3 R_3$$

Если вспомнить известную формулу для связи частоты колебаний в волне со скоростью и длиной волны $c = \lambda \nu$, то полученное из эксперимента условие постоянства произведения частоты на радиус окружности, можно переписать в виде:

$$\frac{\lambda_1}{R_1} = \frac{\lambda_2}{R_2} = \frac{\lambda_3}{R_3} = const$$

то есть длина волны, на которой происходит отсечка, связана прямо пропорционально с радиусом окружности.

В специальной литературе по акустике, рассматривающей распространение изгибных волн в изогнутых стержнях, можно найти, что константа, стоящая в вышеприведенном равенстве, есть не что иное как 2π , а само равенство имеет наглядную геометрическую интерпретацию - длина волны, на которой происходит отсечка, равна длине витка пружины:

$$\lambda = 2\pi R$$

Итак, нам удалось понять, какие физические явления кроются за необычными звуками, которые издают провода и тонкий лед, разгадать некоторые из загадок поставленных пружиной: существование «быстрых» и «медленных» волн, волн с частотой

отсечки. Однако представляется вполне вероятным, что обыкновенная пружина таит в себе ещё немало сюрпризов.

Авторы выражают признательность А.В. Селиверстову и М.А. Миронову за обсуждение и ценные советы, С.Н. Сергееву и К.Дмитриеву за информацию о результатах исследований изгибных волн на льду, а также коллективу Физической Отделения Летней Школы «Исследователь» (ФизЛЭШ-2004 <http://physres.web.ru>), на которой была выполнена данная работа.