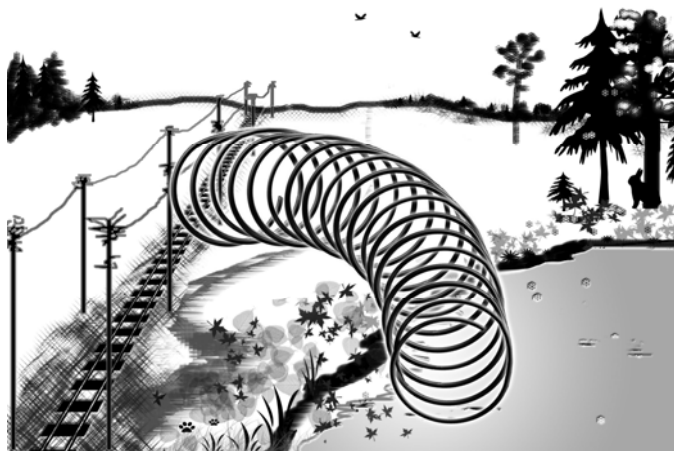


Глава 3. Сюрпризы металлической слинки

Исследовательская группа: Александр Сергеев, Надежда Жданова, Илья Сергачев, Ринат Стрюнцис
Научный руководитель: А.П. Пятаков

С осени, когда пруды начинали покрываться пленкой, мы с нетерпением следили за их замерзанием ... до сих пор еще в моих ушах стоит переливчатый стеклянный звон от камней, бросаемых с берега по тонкому льду
В. Г. Короленко "История моего современника"

Случалось ли Вам, стоя на платформе в ожидании электрички, слышать характерные "чиркающие" звуки, слетающие с проводов? Или проходя мимо только что замерзшего пруда, кинуть камешек-другой вдоль его поверхности, и, замерев, слушать, как при каждом ударе по тонкому слою льда, возникают и разлетаются по ледяному зеркалу странные звуки? Или, наконец, идя вдоль трамвайных рельсов, замечать звонкое чирканье, возникающее при ударе по стыкам рельсов колес трамвая, идущего где-то вдали?



С чем сравнить эти звуки? Одному покажется, будто гигантский хлыст разрезает воздух, другому приходит на ум сравнение с голосами птиц, третий скажет, что это выстрелы лазерного оружия из фантастических фильмов, но если задаться целью изобразить этот характерный звук буквами на письме, лучше всего передается сочетанием «тиу».

Кто сказал «тиу»?

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 отчетливее. 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*.

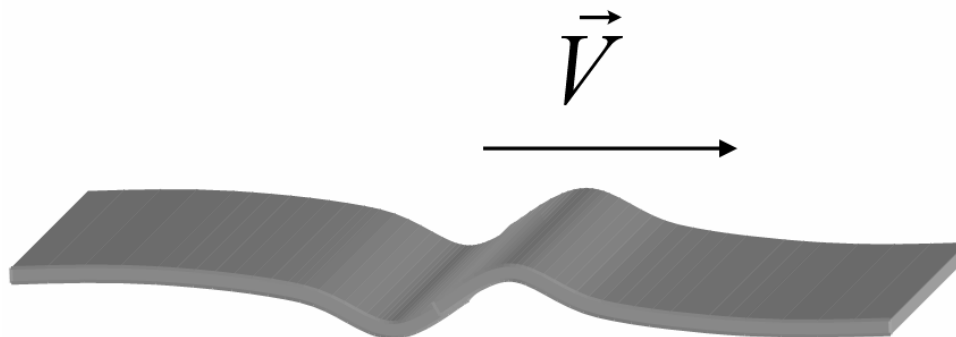


Рис. 1 Изгибная волна

Говорят, что среда распространения волн обладает дисперсией, если скорость волны в этой среде зависит от её частоты. Казалось бы, существование дисперсии звука противоречит повседневному опыту. Действительно, 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 бы воздух дисперсионными свойствами: высокие ноты имели бы иную скорость распространения, чем низкие, и уже для слушателей, сидящих в середине партера, музыка превратилась бы в неузнаваемую мешанину звуков.

Так-то оно так, но дело в том, что наши объекты, будь то рельсы, провода или лед, довольно специфические проводники звука, в отличие от неограниченного и однородного воздушного пространства¹, они 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

¹ Разумеется, при рассмотрении более масштабных явлений нужно брать в расчет неоднородность атмосферы, образование в ней звуковых каналов, наконец, ее ограниченные размеры, но в нашем случае мы будем считать воздушную среду однородной и бесконечно протяженной.

отстают от волн с высокими частотами, и звук удара «растягивается», превращаясь в знакомый нам звук «тиу».

Подопытная слинки

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 все то же «тиу».

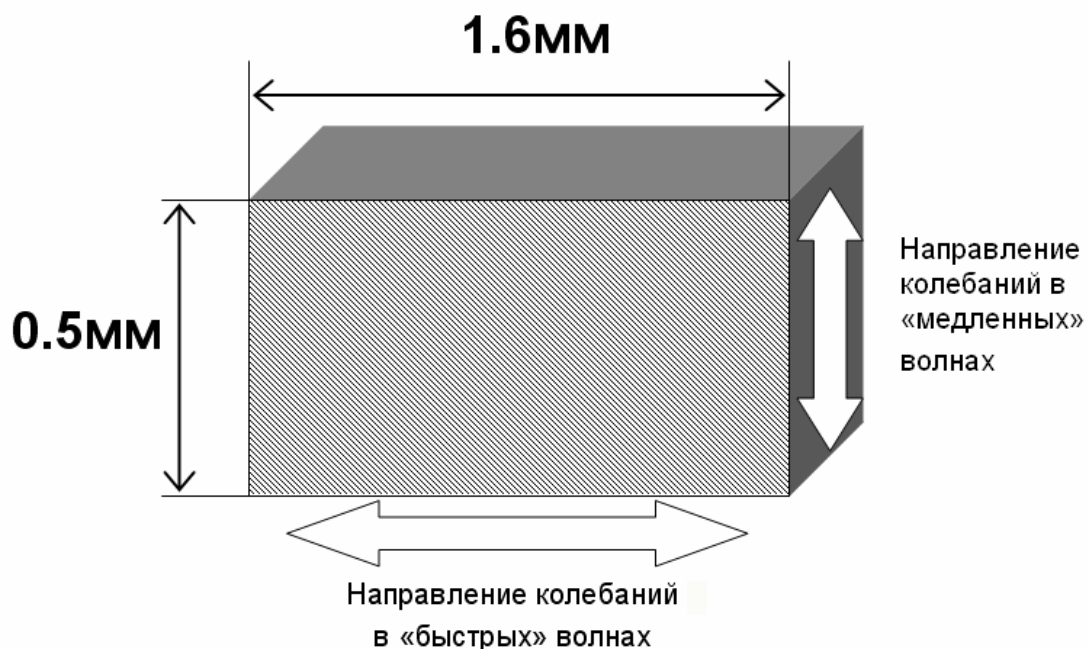


Рис. 3. Сечение металлической ленты, из которой сделана пружина

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 программы обработки звуков (в нашем это была Cool Edit Pro) можно отобразить звук графически – в виде спектрограммы (подробнее о спектрограммах см. предыдущую главу «Рожок избытия»). Обычный вид спектрограммы звуков пружины показан на рисунке 4. Каждая кривая на этом графике отображает один звук «тиу». Форма кривой, напоминающая гиперболу², наглядно демонстрирует характерный переход от высоких частот к низким. Очень похожими кривыми изображается звук от проводов и тонкого льда³. В случае пружины

² Строго говоря, зависимость частоты времени описывается формулой $f \sim 1/t^2$, где t – промежуток времени, прошедший от удара.

³ Исследовательская работа по изучению звуков от тонкого льда была проведена школьником из СУНЦ МГУ К. Дмитриевым под руководством С.Н. Сергеева и представлена на конференции «Юниор-2003». Ими были получены спектрограммы, на которых отчетливо была видна характерная кривая, но только одна.

мы видим сразу несколько волн изображаемых тремя кривыми: две из них стремятся к нулю, а третья – к некоторой постоянной частоте (рис. 4). Но каким образом вместо одного звука, порожденного ударом, мы получаем целых три?

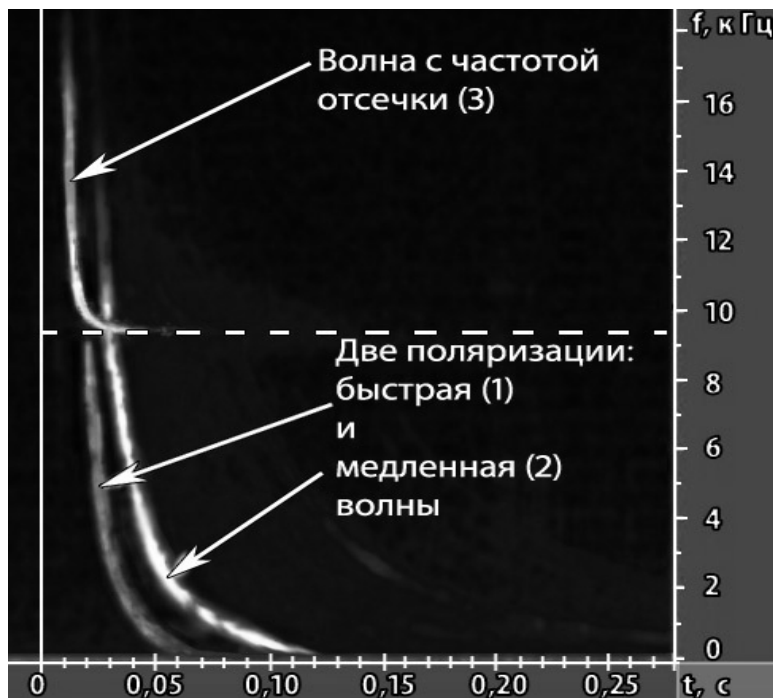


Рис. 4 Спектрограмма (диаграмма звука в осях время – частота). Наибольшей громкости соответствуют наиболее светлый из цветов.

И снова о форме пружины

Геометрия – мать всех естественных наук

Т. Гоббс

Давайте вспомним о трёх характерных 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 во 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:

$$f_1 R_1 = f_2 R_2 = f_3 R_3$$

Если вспомнить известную формулу для связи частоты колебаний f в волне с ее длиной волны λ и скоростью $c = \lambda f$, 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, с помощью пружины нам удалось понять, какие физические явления кроются за необычными звуками, которые издают провода и тонкий лед, но, как часто бывает в исследованиях, ответы на одни вопросы порождают еще большее количество новых загадок, каковыми явились для нас существование «быстрых» и «медленных» волн и волн с частотой отсечки. Нам удалось разгадать их тоже. Однако представляется вполне вероятным, что обыкновенная пружина таит в себе ещё немало сюрпризов⁴.

⁴ О других необычных свойствах пружины можно прочитать в статье Д. Чокина «Слинки – шагающая пружина» (Квант №6 за 1991 г.)