

Звук из трубы

Почему звучит гофрированная труба, если её вращать над головой?

Попробуйте сами убедиться в том, что такая труба действительно звучит. Для эксперимента нужен отрезок пластиковой трубы длиной L от 0,5 м до 1 м. Стенки трубы должны представлять собой «гармошку» - поэтому труба и называется гофрированной. Такие трубы сейчас используются для прокладки электрических кабелей или для соединений труб канализации, но можно встретить такую трубу в магазине детских игрушек. Труба должна быть открыта с двух сторон, и в её стенках не должно быть трещин. Нужно взять трубу за один конец и вращать над головой, постепенно увеличивая скорость вращения.

При некоторой минимальной скорости вращения трубы возникает звук на определенной низкой частоте. Увеличение скорости вращения трубы приводит к изменению характера звука. Частота звучания трубы скачком переходит с низкой на более высокую. Дальнейшее увеличение скорости вращения трубы приводит к еще нескольким последовательным скачкам частоты звука. Удастся получить до 4 – 5 таких скачков частоты звука.

Если воспользоваться микрофоном и осциллографом, то легко заметить, что частоты звука относятся друг к другу $f_1 : f_2 : f_3 : f_4 = 1 : 2 : 3 : 4 : \dots$ как ряд возрастающих целых чисел. Кстати, сам я воспользовался музыкальным образованием сына и попросил его найти на пианино звуки (ноты), звучащие с трубой в унисон. Частоты звуков в эксперименте с имевшейся у меня гофрированной трубой получились примерно такими: 160 Гц, 320 Гц, 480 Гц, 640 Гц.

Длина трубы около 0,5 м, период гофра – 0,6 см, минимальный внутренний диаметр – 24 мм, максимальный внутренний диаметр – 30 мм.

Если закрыть трубу, то никаких звуков при её вращении не возникает. Следовательно, то обстоятельство, что через трубу проходит поток воздуха, является необходимым условием звучания трубы. Втягивается воздух в отверстие трубы у конца, который экспериментатор держит в руке, а выходит воздух наружу из отверстия на другом конце трубы. Средняя скорость V потока воздуха, проходящего через трубу, конечно же, зависит от скорости её вращения. Воздушный поток проходит вдоль оси трубы через разные сечения. Отверстие то сужается до минимального диаметра d , то расширяется до максимального диаметра D , поэтому скорость потока воздуха периодически меняется. В соответствии с уравнением Бернулли:

$$P + \rho V^2/2 = \text{const},$$

такое движение воздуха вызывает периодическое увеличение и уменьшение давления воздуха вдоль оси трубы. Это пульсирующее давление и является причиной появления звука. Основная частота (основной тон) звука f равна отношению средней скорости потока воздуха в трубе к пространственному периоду b гофра:

$$f = V/b.$$

Кроме основной частоты такое изменение давления создает и звуки на «обертонках», то есть на частотах, кратных основной частоте kf . Число k может принимать любые значения 1, 2, 3, и т.д. По мере увеличения скорости вращения трубы и, соответственно, средней скорости потока воздуха через отверстие трубы растет частота основного тона и растет амплитуда переменной составляющей давления. Это означает, что амплитуды начальных колебаний давления на основной частоте и на обертонах тоже увеличиваются.

Если основная частота возникающего звука f (или частота какого-нибудь обертона kf) совпадет с резонансной частотой колебаний столба воздуха в трубе, то именно на данной частоте громкость звучания значительно увеличивается. Резонанс воздушного столба в трубе с открытыми отверстиями на концах соответствует таким колебаниям, что вблизи концов трубы давление равно внешнему атмосферному, то есть на концах трубы расположены узлы стоячей волны давления.

Общая формула для нахождения резонансных частот колебаний у такой трубы:

$$f_n = nC/(2L),$$

где C – скорость звука в воздухе (340 м/с), L – длина трубы. Самая низкая частота звучания соответствует ситуации, когда между двумя узлами стоячей волны давления на концах трубы размещается всего одна пучность стоячей волны. После написания этой формулы, я проверил её на соответствие эксперименту.

$$f_{\text{мин}} = 160 \text{ Гц не равно величине } C/(2L) = 340 \text{ Гц!}$$

Выяснилось, что гофрированная труба звучит на частоте значительно более низкой, чем предсказывает наша формула. Это можно объяснить только тем, что наличие гофра увеличивает эффективную длину трубы. В случае с имевшейся у меня трубой эффективная длина трубы почти вдвое больше, чем расстояние между её концами. Звучание трубы на минимальной частоте 160 Гц возникало при вращении трубы с частотой примерно 1,5 оборота в секунду. Это соответствовало скорости движения одного из концов трубы ≈ 5 м/с. Вдвое большая частота звучания соответствовала вдвое большей частоте вращения трубы. Втрое большая частота звука – втрое большей частоте вращения. Возбуждаются ли стоячие волны на основной частоте звука или на обертонах? Это можно установить, если вычислить, какая устанавливается скорость потока воздуха через трубу при её вращении с частотой f . Наличие гофра приводит к тому, что вблизи оси трубы скорость потока воздуха, скорее всего, значительно больше, чем вблизи стенок трубы. А модуляция давления связана именно с движением воздуха вблизи гофрированных стенок трубы. Задача о потоке воздуха через вращающуюся гофрированную трубу сама по себе, наверное, интересна, но для ответа на вопрос: «*почему* звучит труба?» решать эту задачу, на мой взгляд, нет необходимости.

Если считать, что именно основная частота звука совпадает с резонансной частотой трубы, то этой минимальной резонансной частоте соответствует скорость потока воздуха через трубу:

$$V_{\text{мин}} = b f_{\text{мин}} \approx 1 \text{ м/с.}$$

Я рассказал о результатах эксперимента только с одной трубой. Предлагаю читателям самим провести измерения с трубами разных размеров и с разными характеристиками гофра. Присылайте ваши результаты. Может быть, они опровергнут приведенные в этой статье выводы. Никто не застрахован от ошибок. И автор тоже.

С. Варламов

22 декабря 2001 г.