

11 класс

Акустические резонаторы

В этой задаче не требуется оценка погрешностей!

Оборудование. Компьютер с встроенным ПО и предустановленным микрофоном; трубка; резиновая пробка; вода в мерном стакане; шприц; весы; пластиковая бутылка 0.6 л; набор втулок разной высоты; набор втулок разного диаметра; беруши; штатив; штангенциркуль; линейка; термометр (один на аудиторию).

Введение.

Звук — это распространяющиеся в упругих средах (газах, жидкостях, твердых телах) механические колебания. Для возбуждения этих колебаний нужен механический источник колебаний. В роли такого источника при разговоре обычно выступают голосовые связки, расположенные в гортани. Через гортань проходит поток воздуха, который заставляет связки колебаться (см. Рис.1). Эти колебания возбуждают звук, который мы слышим от собеседника. Частота звука регулируется натяжением связок: так для низких частот связки натянуты слабо, а для высоких сильно (см. Рис.2).

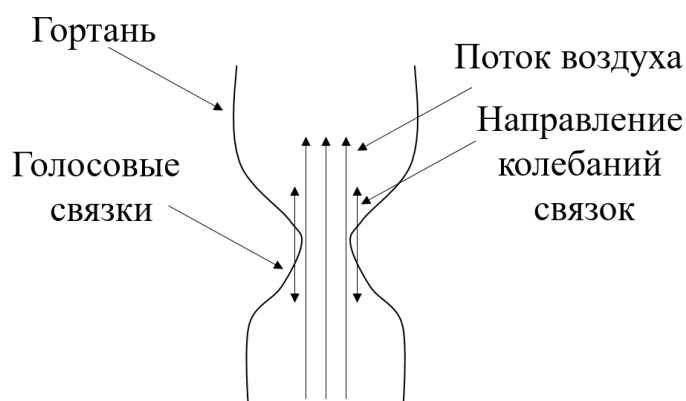


Рис. 1. Вид сбоку.

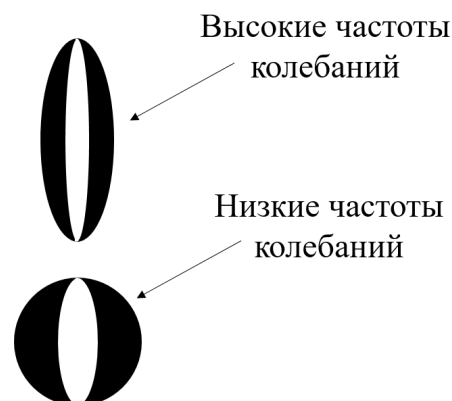


Рис. 2. Вид сверху.

Однако, как и любая другая акустическая система, артикуляционный аппарат нуждается в усилителе или резонаторе. По сути, связки производят звук некоторой частоты или, правильнее сказать, звук определенного спектра, то есть набора некоторых частот. А резонатор, которым в случае акустической системы человека является ротовая полость, усиливает некоторые частоты из этого спектра сильнее, а некоторые слабее. Наиболее низкая сильно выраженная частота спектра называется основной; зачастую именно она определяет тон звука, который мы слышим. Более высокие сильно выраженные частоты спектра носят названия обертонов (см. Рис.3). Таким образом, музыкальные инструменты могут звучать на одной и той же ноте (той же частоте), но восприниматься человеческим ухом по-разному, так как обладают различными обертонами. С точки зрения описания звуковых колебаний во временном, а не в спектральном пространстве, осциллограмма звуков

(зависимость отклонения точек среды от времени) разных инструментов на одинаковой ноте будет отличаться формой повторяющегося сигнала.



Рис. 3. Спектр звука

Экспериментальная часть.

Часть 1. Осциллограммы звука.

Включите компьютер в режим снятия осциллограммы микрофона. В качестве изучаемого музыкального инструмента в этом задании будете выступать непосредственно вы. Спойте гласные звуки «а», «у», «о», «и», «э» на одной частоте из диапазона 200 — 250 Гц. Зарисуйте соответствующие осциллограммы. Какая из пропетых вами букв наиболее соответствует чистому звуку, то есть чья осциллограмма наиболее близка к синусоидальной?

Как видно, звук разных гласных одной и той же частоты сильно отличается. Как уже говорилось выше, причиной отличия является различие в коэффициентах усиления различных обертонов. За усиление звука в механических акустических системах отвечают резонаторы. Ротовая полость является крайне сложным резонатором и не может быть изучена в короткий срок тура олимпиады, однако существуют намного более простые резонаторы, которые в дальнейшем и будут Вами изучаться.

Часть 2. Линейный резонатор.

Наиболее простой резонатор, используемый человеком для извлечения звуков — обыкновенная труба. Всем Вам известно, что существует большое множество духовых инструментов, в которых резонатором является трубка, снабженная различными технологическими устройствами для изменения частоты звучания. Чаще всего у духовых инструментов есть мундштук, который, как и связки, является первоначалом колебаний струи воздуха в инструменте. Однако, так как струя воздуха в любом случае обладает турбулентностью, а, следовательно, неоднородностью и нестационарностью потока, то даже

струя воздуха, выдуваемая нами, обладает некоторым набором звуковых частот (спектром). Набор частот зависит как от характерных размеров струи, так и от ее скорости. Так, при определённых размерах обычной трубки, простое дуновение в нее уже вызывает ее звучание. То есть, в спектре струи воздуха находится резонансная частота, которую усиливает трубка, и происходит ее звучание, которые мы способны уловить ухом.



Рис. 4. Как подуть в трубку и получить звук

1. Возьмите трубку, один ее конец заткните пробкой. Поднесите трубку ко рту, как показано на рис. 4. Направляя струю воздуха вниз, подуйте в трубку. Если приноровиться, то трубка начинает звучать. С помощью программы снятия спектра определите основную частоту (частоту основного тона) звучания трубки. Основная частота звучания трубки зависит от ее длины. Заливая в трубку воду, можно изменять ее эффективную длину (длину полости в трубке).

Снимите зависимость частоты звучания трубки от ее эффективной длины. Предположите координаты, в которых эта зависимость является линейной. Постройте график этой зависимости в линейных координатах. Определите его угловой коэффициент.

Примечание 1. Делайте паузы между измерениями. Слишком частое выдувание воздуха может привести к головокружению.

Примечание 2. Если у Вас не получается извлечь звук из трубки, то перейдите к Части 3.

2. По полученным из предыдущего упражнения данным определите скорость звука в воздухе и сравните её с теоретическим значением $C_{\text{теор}} = (\gamma RT/\mu)^{1/2}$. Температуру воздуха внутри комнаты спросите у дежурного по аудитории. Нарисуйте распределение амплитуд колебаний воздуха внутри трубки, отсчитывая координату от закрытого конца трубки.
3. При выполнении пункта 1 можно заметить, что в некоторых случаях в спектре звучания трубки хорошо прослеживается первый обертон (обертон с наименьшей частотой). Каков округленный до целого коэффициент пропорциональности между частотой основного тона и первого обертона трубки? Нарисуйте распределение амплитуд колебаний воздуха внутри трубки, если бы она звучала только на частоте первого обертона, отсчитывая координату от закрытого конца трубки.

Линейный резонатор является самым простым примером акустического резонатора. Ротовая полость все же является объемным резонатором, простейший пример которого мы изучим в следующей части.

Часть 3. Объемный резонатор

В качестве объемного резонатора будем использовать пластиковую бутылку. Если в нее подуть таким же образом, как и в трубку в пункте 1 предыдущей части, то она также будет звучать на определенной частоте.

1. Для теоретического нахождения частоты основного тона такого резонатора воспользуемся следующей моделью. Представим, что воздух в горлышке бутылки является поршнем, закрывающим остальной воздух в бутылке. Масса поршня соответствует массе воздуха в горлышке. Такой поршень может перемещаться вдоль горлышка бутылки. При движении вниз или вверх от положения равновесия на поршень будет действовать возвращающая сила со стороны остального газа в бутылке, тем самым вызывая колебательные движения такого воздушного поршня. Запишите формулу для частоты колебаний такого поршня (частоты основного тона бутылки) через данные об объеме бутылки, высоте и диаметре горлышка бутылки. Каким процессом следует описывать сжатие газа в бутылке – изотермическим или адиабатическим?
2. Измерьте объем бутылки, а также диаметр и высоту горлышка бутылки.
3. Аналогично первому пункту предыдущего упражнения эффективный объем (объем полости) бутылки можно изменять, доливая в бутылку воду.

Снимите зависимость частоты основного тона бутылки от ее эффективного объема. Постройте исследуемую зависимость в таких координатах, в которых график будет линейным. Найдите угловой коэффициент первого пункта A' графика.

Рассчитайте теоретическое значение углового коэффициента A , используя результаты первого пункта. Сходятся ли полученные теоретическое и экспериментальное значение углового коэффициента?

4. Продолжая проверять модель, предложенную в первой пункте, снимите зависимость частоты основного тона пустой бутылки от высоты горлышка бутылки и постройте ее в таких координатах, в которых она должна получиться линейной.

Для изменения высоты горлышка используйте набор втулок разной высоты, вставляйте их в горлышко узкой частью. Для получения хорошего звучания прижимайте втулку к горлышку. Рассчитайте угловой коэффициент B' полученного графика.

Рассчитайте теоретический угловой коэффициент B , соответствующий модели, предложенной в первом пункте. Сходятся ли полученные теоретическое и экспериментальное значение углового коэффициента? Проходит ли полученный график через точку $(0; 0)$?

5. Снимите зависимость частоты основного тона пустой бутылки от диаметра горлышка бутылки и постройте ее в таких координатах, в которых она должна получиться линейной. Рассчитайте угловой коэффициент C' полученного графика.

Рассчитайте теоретический угловой коэффициент C , соответствующий модели, предложенной в первом пункте. Сходятся ли полученные теоретическое и экспериментальное значение углового коэффициента? Проходит ли полученный график через точку $(0; 0)$?

6. Результаты, полученные в пунктах 3 – 5, позволяют отметить, что модель, предложенная в первом пункте, является не до конца верной. Масса воздуха в горлышке бутылки является мерой инертности колебательной системы. Ясно, что кроме воздуха в горлышке бутылки вместе с ним движутся и соседние слои воздуха. Реальная инертность системы выше, чем предполагается в модели, описанной в упражнении 3.1. Улучшение модели может состоять во введении эффективной длины горлышка:

$$h_{\text{эфф}} = h + \Delta h(D) \quad (1)$$

где $\Delta h(D)$ — это дополнительная длина горлышка, зависящая от его диаметра, описывающая присоединенную массу колеблющегося воздуха. На основе результатов пункта 5 рассчитайте зависимость дополнительной длины горлышка от его диаметра.