

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

- Возбуждение стоячих волн в трубке Кундта, закрытой с обоих концов.
- Измерение зависимости основной частоты от длины трубки Кундта.
- Измерение основной частоты и обертонов при фиксированной длине трубки.
- Определение скорости распространения волны на резонансных частотах.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Возбуждение и измерение стоячих звуковых волн в трубке Кундта.

ЦЕЛЬ ОПЫТА

Звуковые волны в газах являются продольными. Групповая скорость волны равна фазовой скорости. В этом опыте в трубке Кундта, закрытой с обоих концов, возбуждается стоячая волна. Измеряется зависимость основной частоты от длины трубки, а также измеряются частоты основных колебаний и обертона для фиксированной длины трубки.

НЕОБХОДИМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Кол-во	Наименование	№ по каталогу
1	Трубка Кундта модели Е	U8498308
1	Длинный акустический зонд	U8498282
	Блок усилителя для акустических зондов (115 В, 50/60 Гц)	U8498283-115 или
1	Блок усилителя для акустических зондов (230 В, 50/60 Гц)	U8498283-230
1	Генератор сигналов различной формы FG 100 (230 В, 50/60 Гц)	U8533600-230 или
	Генератор сигналов различной формы FG 100 (115 В, 50/60 Гц)	U8533600-115
1	USB-осциллограф 2x50 МГц	U112491
1	Универсальный аналоговый измерительный прибор AM50	U17450
1	Высокочастотный соединительный шнур, байонетный разъем/4-мм штекер	U11257
1	Пара безопасных соединительных проводов для опытов длиной 75 см	U13812
1	Высокочастотный соединительный шнур	U11255

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Можно создать стоячие волны в трубке Кундта, возбуждая волны соответствующей резонансной частоты от громкоговорителя на одном конце трубки, которые затем отражаются от крышки на другом конце. Если длина трубки известна, можно определить скорость распространения волн резонансной частоты и количество гармоник.

Звуковые волны распространяются в воздухе и других газах посредством быстрых изменений давления и плотности. Легче всего их можно описать на основе звукового давления, которое

налагается на атмосферное давление. В качестве альтернативы, вместо звукового давления p для описания звуковой волны можно также использовать скорость звука v . То есть среднюю скорость молекул газа в данной точке x в колеблющейся среде в момент времени t . Давление и скорость звука связаны друг с другом, например, уравнением движения Эйлера:

$$(1) \quad -\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 \cdot \frac{\partial v}{\partial t}$$

ρ_0 : давление газа

В трубке Кундта звуковые волны распространяются вдоль трубки, т.е. их можно описать с помощью одномерного волнового уравнения, которое применяется к скорости и давлению звука:

$$(2) \quad \text{или} \quad \begin{aligned} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2} &= c^2 \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} &= c^2 \cdot \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} \end{aligned}$$

c : скорость звука

В этом опыте изучаются гармонические волны, которые отражаются от конца трубки Кундта. Чтобы найти решения волнового уравнения, необходимо учитывать суперпозицию исходящей и отраженной волн:

$$(3) \quad p = p_{0>} \cdot e^{2\pi i \left(f t - \frac{x}{\lambda} \right)} + p_{0<} \cdot e^{2\pi i \left(f t + \frac{x}{\lambda} \right)}$$

$p_{0>}, v_{0>}$: амплитуды исходящей волны,
 $p_{0<}, v_{0<}$: амплитуды отраженной волны
 f : частота, λ : длина волны

В этом случае

$$(4) \quad f \cdot \lambda = c$$

Подставляя эти решения в уравнение (1) и рассматривая исходящую и отраженную волны по отдельности, можно получить следующее:

$$(5) \quad p_{0>} = v_{0>} \cdot Z \quad \text{и} \quad p_{0<} = v_{0<} \cdot Z.$$

Величину

$$(6) \quad Z = c \cdot \rho_0$$

называют акустическим сопротивлением, и она соответствует сопротивлению волнам самой среды. Эта величина играет ключевую роль при рассмотрении отражения звуковой волны от стенок с полным сопротивлением W :

К ним применимо следующее выражение:

$$(7) \quad r_v = \frac{v_{0<}}{v_{0>}} = \frac{Z - W}{Z + W} \quad \text{и} \quad r_p = \frac{p_{0<}}{p_{0>}} = \frac{Z + W}{Z - W}$$

В этом опыте W намного больше, чем Z , поэтому мы можем принять $r_v = 1$ и $r_p = -1$.

Если для простоты выбрать положение отражающей стенки $x = 0$, пространственную составляющую звуковой волны можно получить из выражения (3) следующим образом:

$$(8) \quad p = p_{0>} \cdot \left(e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} + e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

$$= 2 \cdot p_{0>} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

и

$$v = v_{0>} \cdot \left(e^{-2\pi i \frac{x}{\lambda}} - e^{+2\pi i \frac{x}{\lambda}} \right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

$$= -2 \cdot i \cdot v_{0>} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x\right) \cdot e^{-2\pi i f t}$$

Какой-либо физический смысл имеют только вещественные составляющие этих выражений. Они соответствуют стоячим звуковым волнам, которые имеют пучность давления у стенки на конце (т.е. в точке $x = 0$), а скорость

звука в этой точке имеет узел своего колебания. Скорость опережает по фазе давление на 90° . Звуковые волны создаются громкоговорителем на расстоянии L от стенки. Эти волны колеблются с частотой f . В этой точке давление также имеет пучность, а скорость – узел. Такие граничные условия выполняются, только если L кратно половине длины волны:

$$(9) \quad L = n \cdot \frac{\lambda_n}{2}$$

Тогда, согласно выражению (3), для резонанса частоты должны удовлетворять следующему условию:

$$(10) \quad f_n = n \cdot \frac{c}{2 \cdot L}$$

При проведении опыта частота f громкоговорителя непрерывно меняется, а акустический датчик измеряет звуковое давление на отражающей стенке. Резонанс имеет место тогда, когда сигнал акустического датчика имеет максимальную амплитуду.

ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ

Согласно выражению (9), определяемые резонансные частоты, f_n , должны иметь длины волн

$$\lambda_n = \frac{2 \cdot L}{n}$$

Чтобы проверить уравнение (3) и определить длину волны, значения длин волн следует нанести на график f от λ .

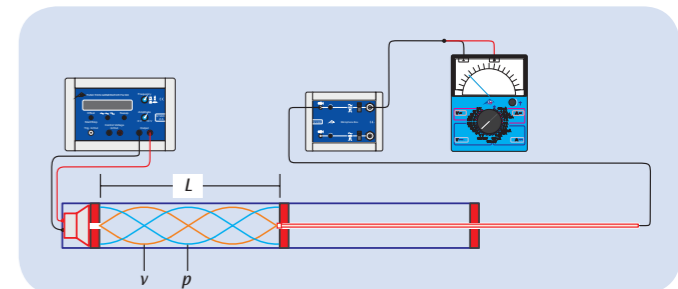


Рис. 1: Схема установки для проведения опыта

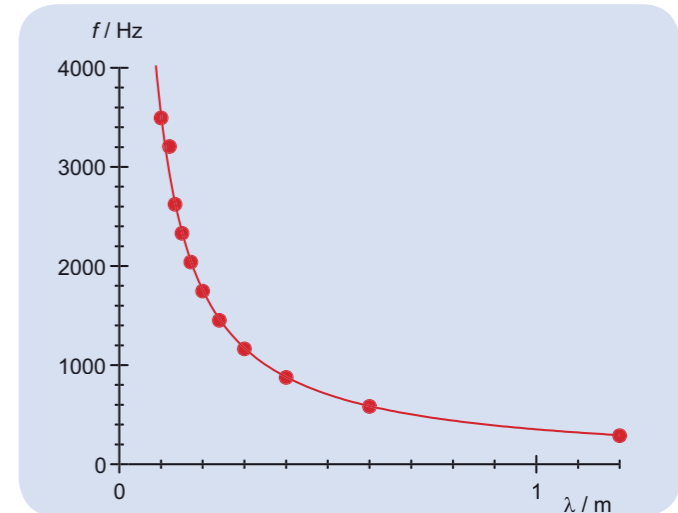


Рис. 2: График зависимости частоты от длины волны