

## ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ВОЛН В ЖИДКОСТИ

Цель работы:

Изучение распространения упругих волн в жидкости, определение их скорости и сжимаемости жидкости.

Задачи:

1. Измерить серию координат отражателя ультразвукового интерферометра, при которых достигается максимум амплитуды колебаний напряжения на пьезоэлектрическом преобразователе.
2. По результатам п.1 вычислить длину звуковой волны в жидкости.
3. По длине волны и ее частоте вычислить фазовую скорость звуковой волны.
4. Вычислить коэффициент адиабатической сжимаемости жидкости.

## ВВЕДЕНИЕ

Упругая волна в жидкости состоит из чередующихся в пространстве и меняющихся во времени ее сжатий и разрежений. Эта волна продольная, т.е. колебательные движения частиц жидкости (не молекул, а малых объемов), приводящие к сжатию и разрежению, происходят в направлении распространения волны. Скорость распространения упругих волн  $v$  зависит от свойств жидкости:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\rho \cdot \beta}} \quad (1)$$

Здесь  $\rho$  - плотность жидкости,  $\beta$  – ее коэффициент сжимаемости, который определяется как относительное изменение плотности при изменении давления  $\beta = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dP}$ , где  $P$  – давление.

Быстрое сжатие жидкости приводит к ее нагреву, а быстрое разрежение – к охлаждению. Однако сжатия и разрежения при больших частотах следуют друг за другом настолько быстро, что соседние участки жидкости не успевают обмениваться теплом. Поэтому процесс распространения упругих волн в жидкости считают адиабатическим, т. е. протекающим без теплообмена, а сжимаемость жидкости, найденную из (1):

$$\beta = \frac{1}{v^2 \cdot \rho} \quad (2)$$

называют адиабатической сжимаемостью.

Расстояние  $\lambda$ , на которое перемещается гребень волны за один период  $T$  колебаний частиц жидкости, называется длиной волны.

$$\lambda = v \cdot T = v/f \quad (3)$$

В зависимости от частоты  $f = 1/T$ , с которой происходят колебания частиц в волне, волны делят на звуковые ( $f = 20$  Гц - 20 кГц), инфразвуковые ( $f < 20$  Гц) и ультразвуковые ( $f > 20$  кГц).

Множество точек, до которых доходят колебания к моменту времени  $t$ , называют фронтом волны. Во многих случаях к достаточно точным результатам приводит модель плоской волны, фронт которой рассматривается как плоскость.

Уравнение плоской бегущей волны, распространяющейся вдоль оси  $X$ , имеет вид:

$$S = A \cdot \cos[2\pi \left( f \cdot t - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0] \quad (4)$$

Здесь  $S$  - смещение частицы из положения равновесия вдоль оси  $X$  в момент времени  $t$ ,  $A$  - амплитуда смещения, выражение в квадратных скобках - фаза,  $\varphi_0$  - начальная фаза. Если в жидкости распространяются две бегущие волны, рожденные одним источником, то возникает явление интерференции: в одних точках колебания усиливают, а в других ослабляют друг друга.

Важный случай интерференции наблюдается при наложении двух встречных плоских волн одинаковой амплитуды. Возникающий в результате колебательный процесс называют стоячей волной. Ее уравнение при  $\varphi_0 = 0$  записывают в виде:

$$S = 2A \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (5)$$

В каждой точке стоячей волны происходят колебания той же частоты  $f$ , что и у набегающих волн. Амплитуда  $A^*$  колебаний частиц жидкости зависит от координаты  $x$ :

$$A^* = 2A \cdot \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right)$$

В точках, для которых  $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n \cdot \pi$ , где  $n = 0, 1, 2, 3 \dots$  амплитуда достигает максимального значения  $2A$ . Эти точки называют пучностями стоячей волны. Их координаты:

$$x_n = \pm n \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (n = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (6)$$

В точках, для которых  $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm(m + \frac{1}{2}) \cdot \pi$ , где  $m = 0, 1, 2, 3 \dots$  амплитуда обращается в нуль. Эти точки называют узлами стоячей волны. Координаты узлов определяют как:

$$x_n = \pm(m + \frac{1}{2}) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) следует, что расстояние между соседними пучностями или соседними узлами равно  $\frac{1}{2}\lambda$ . Это дает возможность измерить длину волны: надо создать в жидкости режим стоячих волн и измерить координаты ближайших пучностей или узлов (напр.,  $x_1$  и  $x_0$ ). Тогда согласно формулам (6) и (7) длина волны определяется как:

$$\lambda = 2(x_1 - x_0)$$

Однако для уменьшения погрешности измерения, следует находить  $\lambda$  по координатам  $x_n$  и  $x_0$ , между которыми заключено  $n$  полуволн:

$$\lambda = \frac{2}{n} \cdot (x_n - x_0) \quad (8)$$

При этом погрешность измерения  $\lambda$  вычисляют по формуле:

$$\Delta\lambda = \frac{2}{n} \cdot \sqrt{(\Delta x_n)^2 + (\Delta x_0)^2} \quad (9)$$

и она окажется в  $n$  раз меньше, чем в первом случае. Кроме того, с целью дополнительного снижения погрешности  $\Delta\lambda$  рекомендуется проводить многократные измерения координат  $x_0$  и  $x_n$ , что может привести к уменьшению погрешностей  $\Delta x_0$  и  $\Delta x_n$ . Вычислив  $\lambda$ , нетрудно найти скорость распространения волн  $v$  из формулы (3). По значению скорости  $v$  и известной плотности жидкости  $\rho$  можно вычислить по формуле (2) адиабатическую сжимаемость.

#### УСТАНОВКА

Установка представляет собой ультразвуковой интерферометр. В нем упругая волна создается за счет обратного пьезоэлектрического эффекта. Этот эффект заключается в том, что при подаче на пьезокристалл электрического напряжения он деформируется.

В интерферометре, схема которого приведена на Рис. 1, колебания возникают при подаче на пьезокристалл 1 синусоидального электрического сигнала ультразвуковой частоты от генератора G через резистор R. Кристалл закреплен на металлическом дне 2 стеклянного стакана 3 с маслом 4. Пьезокристалл заставляет колебаться дно стакана и прилегающие частицы жидкости, т.е. возбуждает в жидкости ультразвуковую волну. В верхней части стакана в жидкости помещается отражатель 5 в виде массивного металлического диска. Он может перемещаться с помощью микрометрического винта 6. Изображение установки показано на Рис. 2. Волна, идущая от дна стакана, после отражения меняет свое направление на обратное. В результате интерференции прямой и обратной волн в

пространстве между дном стакана и отражателем устанавливается стоячая волна. Частицы жидкости, непосредственно контактирующие с отражателем, не могут смещаться, и поэтому на отражателе всегда находится узел стоячей волны. Амплитуда колебаний частиц у дна стакана определяется амплитудой напряжения на пьезокристалле.

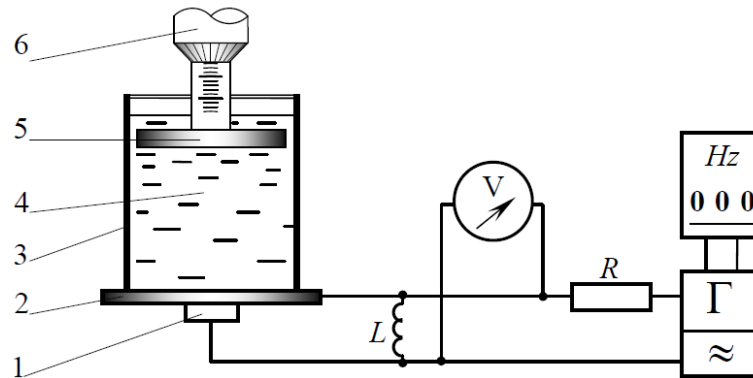


Рис.1



Рис.2

Пьезокристалл характеризуется собственной (резонансной) частотой механических колебаний  $f_p$  и некоторой емкостью  $C$ . Вместе с катушкой индуктивности  $L$  он образует колебательный контур. Индуктивность катушки подобрана так, чтобы собственная частота этого контура совпадала с  $f_p$ . При этом эффективность преобразования электрических колебаний в механические будет *наибольшей*.

*Амплитуда колебаний жидкости в ее объеме меньше, чем у дна стакана, мощность, расходуемая на вязкое трение в масле минимальна, а, следовательно, напряжение на контуре максимально, если число полувольт между дном стакана и отражателем будет полуцелым (Рис.3, положение отражателя 1).*

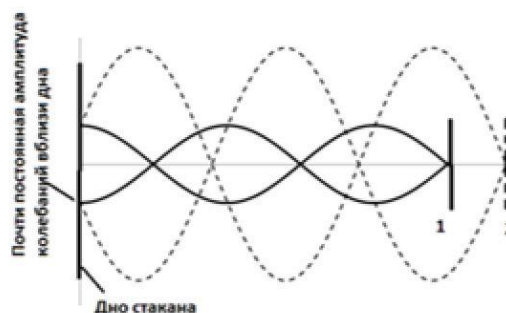


Рис. 3

Наоборот, если между дном стакана и отражателем укладывается целое число полувольт (Рис.3, положение отражателя 2), амплитуда колебаний жидкости почти во всем объеме больше, чем у дна стакана, мощность, расходуемая на вязкое трение максимальна, а, следовательно, напряжение на контуре минимально. Таким образом, изменяя положение отражателя с помощью микрометрического винта 6, можно добиваться максимума или минимума напряжения на контуре. Расстояния между соседними положениями отражателя, при которых наблюдается максимум напряжения на контуре, равно половине длины упругой волны в масле.

### ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Переключатель пределов измерения милливольтметра первоначально поставьте в положение 300 мВ.
2. Установите частоту сигнала на выходе генератора равной резонансной частоте излучателя, указанной на стенде. Для измерения частоты используйте частотомер.
3. Ручками регулировки выходного напряжения генератора установите его значение в пределах от 0,3 В до 0,5 В.

Отсчет напряжения в зависимости от типа генератора производится либо по вольтметру на его лицевой панели, либо по положениям ручек ступенчатой и плавной регулировки напряжения.

4. Медленно вращая головку микрометрического винта в одном направлении, добейтесь того, чтобы стрелка вольтметра периодически изменяла положение между некоторыми максимальным и минимальным значениями. Удовлетворительным можно считать размах движения стрелки в 4-5 малых делений шкалы. Увеличить перемещение стрелки можно одновременным подбором напряжения на выходе генератора и положения переключателя пределов на вольтметре.

5. С помощью микрометрического винта установите отражатель на 5-10 мм от дна стакана в положение, которому отвечает максимальное отклонение стрелки вольтметра. Сделайте начальный отсчет  $x_0$  по шкалам микрометра с точностью до 0.01 мм и результат запишите в таблицу. В последний столбец запишите показания частотомера с точностью до 0.1 кГц.

Табл. Положения отражателя, при которых наблюдался максимум напряжения на контуре.

$i$	$x_i$ , мм	$(x_i - x_{i-1})$ , мм	$f$ , кГц
0	..		
	..		
	..		
	..		
	..		
1			
...			
...			
10	..		
	..		
	..		
	..		
	..		

Для уменьшения случайной погрешности измерения координаты  $x_0$  выполните 5 раз. Для этого медленным вращением головки микрометрического винта добейтесь небольшого

отклонения стрелки вольтметра из положения максимума, а затем снова вернитесь к тому же положению максимального отклонения. Результаты повторных отсчетов запишите в ту же строку таблицы.

6. Так же медленно с помощью микрометрического винта поднимайте отражатель, наблюдая за стрелкой вольтметра. Записывайте в таблицу отсчеты координат отражателя при каждом следующем максимуме напряжения.

7. Положение, соответствующее последнему 11 максимуму  $x_{10}$  (но с номером 10, т.к. нумерация максимумов идет от 0 до 10), измерьте 5 раз, как и для  $x_0$ .

8. Для контроля правильности отсчетов в процессе измерений следите за тем, чтобы разности между двумя ближайшими координатами  $x_i$  и  $x_{i-1}$  были примерно равными. В каждую строку таблицы записывайте показания частотомера.

9. По данным таблицы вычислите средние значения координат начального  $x_0$  и конечного  $x_{10}$  положений отражателя, а также частоты  $f$ . Вычислите погрешности измерений указанных величин по правилам оценки погрешности многократных прямых измерений.

10. Вычислите длину волны  $\lambda$  по формуле (8), скорость распространения упругих волн  $v$  по формуле (3) и адиабатическую сжимаемость масла по формуле (2).

11. Найдите погрешности измерения указанных величин по правилам оценки погрешностей косвенных измерений. Погрешность  $\Delta\lambda$  вычислите по формуле (9). Формулы погрешности для скорости волны  $\Delta v$  и адиабатической сжимаемости  $\Delta\beta$  выведите самостоятельно.

Плотность жидкости и погрешность ее измерения указаны на стенде.

12. Запишите окончательный результат для длины волны, скорости звука в масле и адиабатической сжимаемости масла.

13. Сравните полученные значения для скорости звука и адиабатической сжимаемости с табличными значениями. Примечание: в работе используется касторовое масло.

#### *КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ*

1. Чем отличаются бегущая и стоячая волны? Как используют стоячие волны для измерения длины волны?

2. Какова в установке роль стрелочного вольтметра?

3. Как делают отсчет с помощью микрометрического винта? Какова его приборная погрешность?

4. Почему не удастся перемещением отражателя сильно (скажем, в несколько раз) изменять напряжение на пьезокристалле?

5. Почему нужно работать с определенной частотой генератора? Как она в установке выбрана?