

Методические указания

С.В. Чумакова

Лабораторная работа М-61

СТОЯЧИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Под редакцией проф. О.С. Литвинова

2014 год

Стоячие ультразвуковые волны

Цель работы — получить продольную ультразвуковую волну и ее отражение от металлической преграды, проанализировать суперпозицию падающей и отраженной ультразвуковых волн, из чего получить длину волны стоячей волны и ультразвуковой волны источника.

Экспериментальная установка

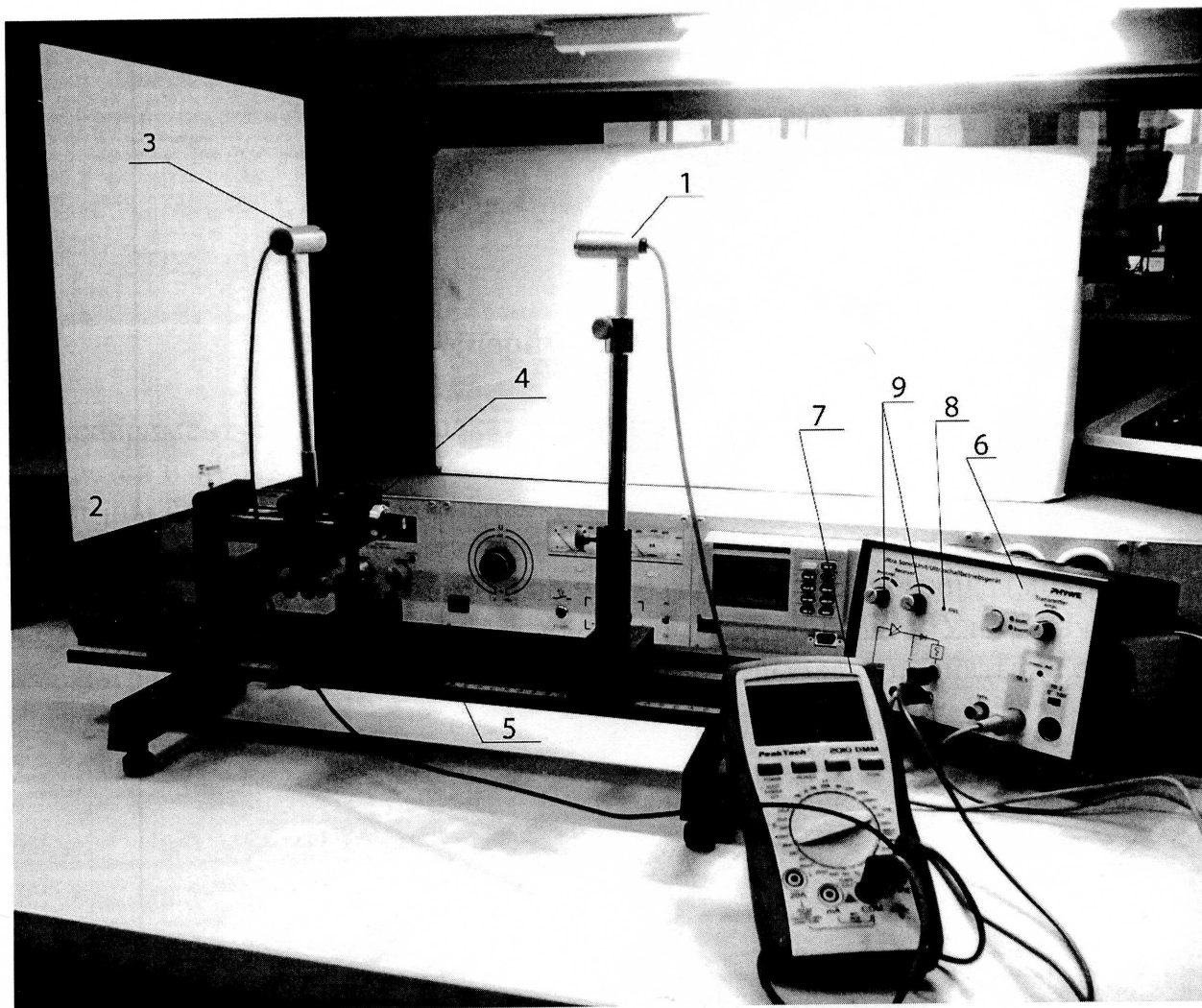


Рис.1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка изображена на рис.1. Ультразвуковая волна создается излучателем 1 и отражается от поверхности металлической пластины 2. Отраженная волна налагается на падающую волну, что приводит к образованию стоячей волны. Интенсивность стоячей волны вдоль направления измеряется с помощью ультразвукового приемника (микрофона) 3. Приемник 3 можно перемещать с помощью устройства 4. Ультразвуковой излучатель 1 и ультразвуковой приемник 3 должны быть подняты на одну и

ту же высоту и их продольные оси должны быть вертикальными и параллельными друг другу. Излучатель 1 располагается вдоль оптической скамьи 5 и строго вертикально к отражающей пластине 2. Приемник 3 располагается параллельно к отражающей пластине 2 и приблизительно на расстоянии 5 см от нее (смотри рис.2). Расстояние между излучателем 1 и отражающей пластиной 2 должно быть $d=(25-30)$ см.

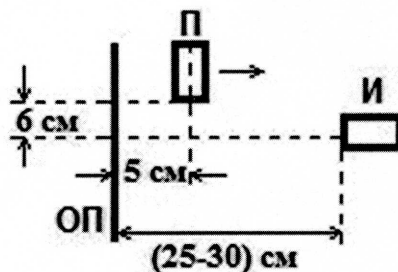


Рис.2. Диаграмма расположения приборов (И-излучатель, П-приемник, ОП-отражающая плоскость)

Соедините излучатель 1 с блоком питания 6, для чего разъем на конце проводника от излучателя вставить в отверстие «TR1» блока питания 6 и управлять напряжением на излучатель 1 в непрерывном режиме «Transmitter Ampl» ручкой над входом «TR1». При этом должна быть нажата кнопка «Cont» и гореть около нее лампочка красного цвета.

Соедините приемник 3 разъемом на конце проводника от приемника к левой «BNC» муфте (перед усилителем) блока 6. Сигнал с приемника 3, усиленный и выпрямленный, подать на вольтметр 7 постоянного напряжения «2010 ДММ». Вольтметр должен измерять до 20В постоянного напряжения.

Чтобы гарантировать пропорциональность между входным сигналом с приемника на усилитель и его выходным с усилителя, необходимо избегать работу усилителя в режиме перегрузки. При перегрузке загорается красная лампочка 8. Чтобы избежать перегрузку, нужно плавно регулировать ручками 6 и 9 (смотри рис. 1).

Чтобы исследовать область стоячей волны, нужно использовать скользящее приспособление 4 (смотри рис. 1) с микрометрическим винтом. Полный оборот микрометрического винта обеспечивает перемещение приемника в горизонтальном направлении на 0,5мм. При вращении ручки микрометрического винта «против часовой стрелки» приемник приближается к экрану 2, при вращении ручки микрометрического винта «по часовой стрелке» приемник удаляется от экрана 2. Удаляя приемник с помощью микрометрического винта с шагом 0,5мм (один оборот) от экрана 2, необходимо на каждом шаге измерять напряжение U .

Замечание:

Обычно невозможно полностью избавиться от влияния на сигнал от приемника отраженных сигналов от окружающих предметов. Чтобы

максимально уменьшить влияние окружающих предметов, нельзя располагать эксперимент в узких комнатах, а также в непосредственной близости от отражающих поверхностей (стен, шкафов и т. д.).

Теория и анализ данных

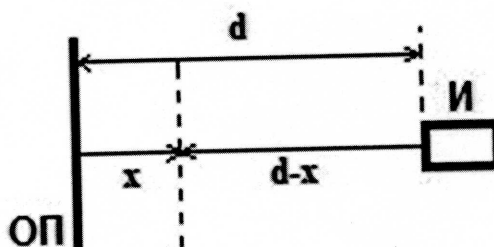


Рис.3. Обозначения расстояний (И-излучатель, ОП-отражающая поверхность)

На рис.3 показаны: излучатель ультразвуковой волны, которая реально является сферической, но при выбранном расположении металлической плоскости, приемника и для того, чтобы не делать математическую трактовку излишне трудной, будем предполагать, что плоская волна распространяется от излучателя и отражается без потерь от металлической плоскости, то есть предполагается, что падающая и отраженная волны имеют одинаковую частоту и амплитуду. Суперпозиция падающей и отраженной волн создает стоячую волну.

Уравнение плоской волны излучателя

$$\xi(x,t) = A \cos(\omega t - kx) \quad (1)$$

в точке расположения. Но приемник, как микрофон, регистрирует изменения давления окружающей среды. Давление, создаваемое ультразвуковой волной, меняет давление равновесной окружающей среды. Это изменение давления зависит от относительной деформации среды $\frac{\partial \xi}{\partial x}$ и от упругих свойств среды.

Из уравнения (1)

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = kA \sin(\omega t - kx) \quad (2)$$

а учет упругих свойств среды позволяет уравнение волны излучателя представить в виде

$$p_1(x, t) = p_0 \sin(\omega t - kx). \quad (3)$$

Уравнение отраженной ультразвуковой волны в точке расположения приемника имеет вид

$$p_2(x, t) = p_0 \sin(\omega t - k(2d - x)) \quad (4)$$

В результате сложения волн (3) и (4) образуется стоячая волна $p = p_1 + p_2$:

$$p(x, t) = 2p_0 * \sin \left[\frac{\omega t - kx + \omega t - k(2d - x)}{2} \right] * \cos \left[\frac{\omega t - kx - \omega t + k(2d - x)}{2} \right].$$

$$\text{Или } p(x, t) = 2p_0 * \sin(\omega t - kd) * \cos[k(d - x)]. \quad (5)$$

Стоячая волна $p(x, t)$ периодична в пространстве и во времени. Амплитуда стоячей волны равна $2p_0 * \cos[k(d - x)]$. Максимум амплитуды стоячей волны тогда, когда \cos функции становится равным 1, другими словами, когда его аргумент принимает значения $0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$, т. е., когда $[k(d - x)] = n\pi$, а $(d - x) = \frac{1}{k} * n\pi$, где k -волновое число, равное $\frac{2\pi}{\lambda}$. Отсюда $(d - x) = n * \frac{\lambda}{2}$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$). Следовательно, расстояние между соседними максимумами амплитуд равно $\frac{\lambda}{2}$. Это расстояние называют длиной стоячей волны $\lambda_{ст}$. Длина стоячей волны в два раза меньше длины ультразвуковой волны излучателя λ .

Когда $\cos[k(d - x)]$ в уравнении (5) равен нулю, тогда амплитуда изменяемого звукового давления также равна нулю. Это будет тогда, когда аргумент \cos , а именно $k(d - x)$ равен нечетному числу $\pi/2$, т. е.

$[k(d - x)] = (2n + 1) \frac{\pi}{2}$, где ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) и при $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; $(d - x) = (2n + 1) \frac{\lambda}{4}$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$). Расстояние между соседними минимумами амплитуд также равно $\frac{\lambda}{2}$ или длине стоячей волны $\lambda_{ст}$.

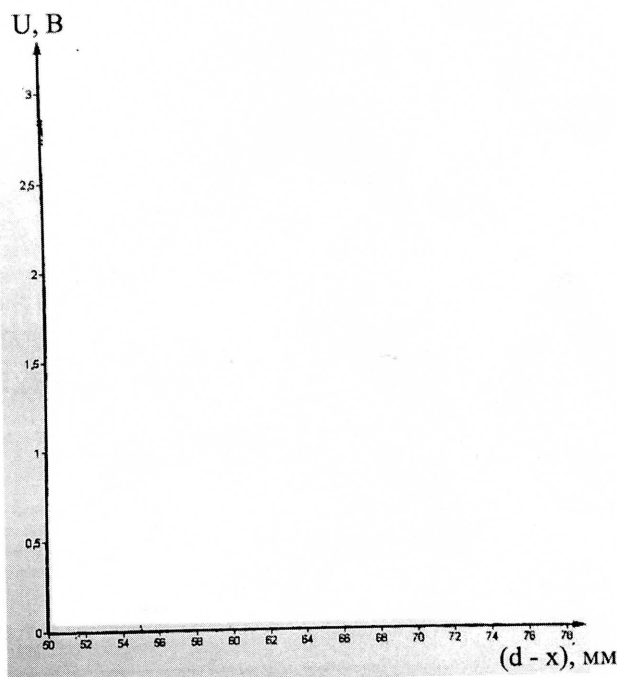


Рис.4 Координатные оси для фиксирования измерений напряжения.
Горизонтальная ось $(d-x)$ должна быть во всю длину листа А4.

Для экспериментального определения длины ультразвуковой волны λ заготовьте на миллиметровой бумаге размером А4 координатные оси как показано на рис.4. Установите приемник ультразвуковых волн 3 с помощью устройства с микрометрическим винтом 4 на расстоянии (5-6)см от металлической отражающей пластины 2 (см. рис.1), перемещайте приемник с помощью микрометрического винта, удаляя его от плоскости, и следите за показаниями U вольтметра. Когда значение напряжения U достигнет максимального значения, измерьте его и отложите на графике (см. рис.4) при $(d - x) = 50$ мм. Последующие значения напряжения U откладывайте, увеличивая расстояние от отражающей плоскости каждый раз на 0,5мм, т. е. на один оборот микрометрического винта (замечание: лампочка 8 («OVL») за все время измерений не должна включаться, если это произойдет, то нужно немного снизить напряжение ручками 9, а измерения повторить с самого начала). Получится кривая с явно выраженными максимумами и минимумами, как, например, на рисунке 5. На основании графика составьте таблицу положений максимумов и минимумов, а также расстояний между ними.

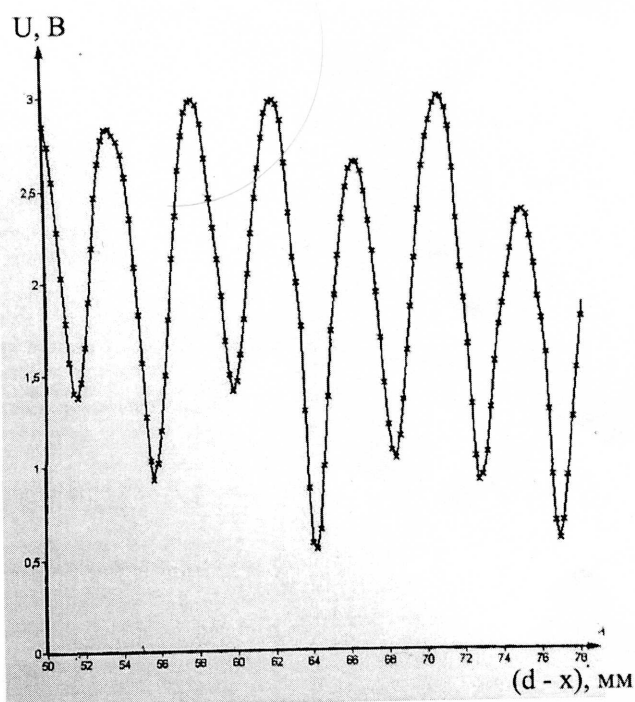


Рис.5 Полученные напряжения U при различных расстояниях.

Положения максимумов и минимумов

Положения максимумов	Расстояния между максимумами	Положения минимумов	Расстояния между минимумами
$(d - x)$, мм	$\Delta(d - x)$, мм	$(d - x)$, мм	$\Delta(d - x)$, мм

Расстояние между соседними максимумами и минимумами $\Delta(d - x)$ равно длине стоячей волны $\lambda_{ст}$ или половине длины ультразвуковой волны $\lambda/2$. Рассчитайте из всех значений и для максимумов, и для минимумов среднее значение длины стоячей волны $\langle \lambda_{ст} \rangle$. Определите погрешность ее определения. Для этого проведите расчет по формуле:

$$\Delta\lambda_{ст} = \frac{1}{n} (\sum | \langle \lambda_{ст} \rangle - \lambda_{iст} |),$$

где n – число всех значений $\Delta(d - x)$ в таблице. Их должно быть не меньше шести (трех максимумов и трех минимумов). Результат записать в виде:

$$\lambda_{ст} = (\langle \lambda_{ст} \rangle \pm \Delta\lambda_{ст}).$$

Определите длину ультразвуковой волны

$$\lambda_{уз.в} = (2 \langle \lambda_{ст} \rangle \pm 2\Delta\lambda_{ст}).$$

Для сравнения рассчитайте длину ультразвуковой волны по частоте $f = 40 \text{ кГц}$ излучателя и скорости звука в воздухе при температуре $t = 20^\circ \text{ С}$, равной $v = 343 \text{ м/с}$. Для расчета используйте соотношение $\lambda_{уз.в} = v/f$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем отличие упругих звуковых волн от упругих ультразвуковых волн?
2. В данной работе излучатель ультразвуковых волн имеет малые размеры и излучает сферические упругие волны. Запишите уравнение сферической волны.
3. Стоячая волна образуется в результате наложения двух встречных волн одинаковой частоты. Будет ли уравнение (5) уравнением бегущей волны или это уравнение колебаний с меняющейся амплитудой?
4. Каковы условия интерференционных максимумов и минимумов амплитуды стоячей волны (5)?