

# ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ЗВУКОВОЙ ВОЛНЕ В ЖИДКОСТИ

Пазов Тенгиз, Симухин Егор, группа Б03-302

Работа 4.3.2А

**Анотация:** 1) В работе изучается дифракция света на синусоидальной акустической решетке и наблюдается фазовая решетка. Измеряется длина волны ультразвука и скорость ультразвука в воде. 2) В работе используются оптическая скамья, осветитель, два длиннофокусных объектива, кювета с жидкостью, кварцевый излучатель с микрометрическим винтом, генератор звуковой частоты, линза, горизонтальная нить на рейтере, микроскоп.

## Теоретическое введение

При прохождении ультразвуковой волны через жидкость в ней возникают периодические неоднородности коэффициента преломления, создается фазовая решетка, которую мы считаем неподвижной ввиду малости скорости звука относительно скорости света. Показатель преломления  $n$  изменяется по закону:

$$n = n_0(1 + m \cos \Omega x) \quad (1)$$

Здесь  $\Omega = 2\pi/\Lambda$  — волновое число для ультразвуковой волны,  $m$  — глубина модуляции  $n$  ( $m \ll 1$ ).

Положим фазу  $\phi$  колебаний световой волны на передней стенке кюветы равной нулю, тогда на задней поверхности она равна:

$$\phi = knL = \phi_0(1 + m \cos \Omega x) \quad (2)$$

Здесь  $L$  — толщина жидкости в кювете,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число для света.

После прохождения через кювету световое поле есть совокупность плоских волн, распространяющихся под углами  $\theta$ , соответствующими максимумам в дифракции Фраунгофера:

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda \quad (3)$$

Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1. Зная положение дифракционных максимумов, по формуле (1) легко определить длину ультразвуковой волны, учитывая малость  $\theta$ :  $\sin \theta \approx \theta \approx l_m/F$ , где  $l_m$  — расстояние от нулевого до последнего видимого максимума,  $F$  — фокусное расстояние линзы. Тогда получим:

$$\Lambda = m\lambda F/l_m \quad (4)$$

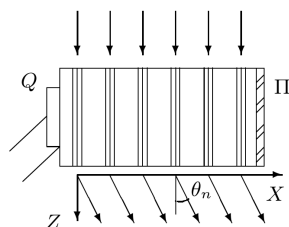


Рис. 1: Дифракция световых волн на акустической решетке

Скорость ультразвуковых волн в жидкости, где  $\nu$  — частота колебаний излучателя:

$$v = \Lambda \nu \quad (5)$$

## Методика измерений

Используются следующие методы изучения дифракции:

2.1.) Метод определения длины волны по дифракционной решетке, основанный на построении графика  $x_m(m)$  (положения дифракционных максимумов от номера максимума), чтобы по формуле (4) найти длину волны.

2.2.) Метод измерения скорости ультразвука в воде по коэффициенту наклона графика  $\Lambda(\frac{1}{\nu})$ .

2.3.) Метод темного поля, заключающийся в устранении центрального дифракционного максимума с помощью специального экрана (проволочки).

**Схема установки.** Схема установки приведена на рисунке 2. Источник света Л через светофильтр Ф и конденсор К освещает вертикальную щель S, находящуюся в фокусе объектива  $O_1$ . После объектива параллельный световой пучок проходит через кювету С перпендикулярно акустической решетке, и дифракционная картина собирается в фокальной плоскости объектива  $O_2$ , наблюдается при помощи микроскопа М.

Предварительную настройку установки произведем в соответствии с инструкцией с зеленым фильтром, далее в работе используется красный.

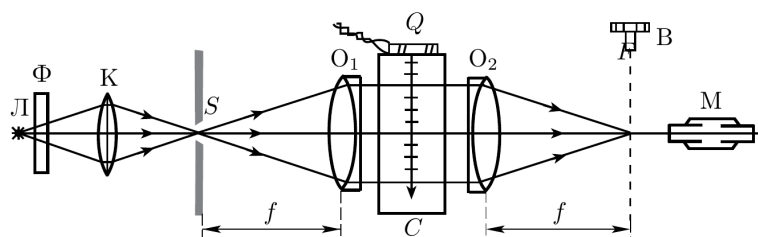


Рис. 2: Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

Параметры установки: фокусное расстояние объектива  $F = 30$  см, одно деление винта микроскопа составляет 20 мкм, полоса пропускания фильтра  $\lambda = 6400 \pm 200 \text{ \AA}$ .

**Оборудование и инструментальные погрешности.**

Погрешность микрометрического винта (отсчётного устройства): 0.01 мм (ввиду жесткой болтанки).

Погрешность микрометрического винта (излучателя): 0.01 мм.

## Результаты измерений

1. Исследовали изменения дифракционной картины на красном свете. При увеличении частоты УЗ-генератора и приближении к 1,1 МГц проявляется дифракционная решетка: расстояние между максимумами растет.

Измерили положения  $x_m$  дифракционных максимумов с помощью микроскопического винта для пяти частот. Для каждой полосы измерили крайние координаты и рассчитали среднее относительно нулевого максимума как координату полосы. Результаты измерений занесли в таблицы ниже. На основе каждой таблицы построили графики зависимости  $x_m(m)$ .

1. Для частоты  $\nu_1 = 1,0116 \pm 0,0001$  МГц:

$m$	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
$x_m$ , дел.	2,225	2,50	2,80	3,10	3,425	3,70	3,975	4,275
$x_m$ , мкм	-350	-240	-120	0	130	240	350	470

2. Для частоты  $\nu_2 = 1,2092 \pm 0,0001$  МГц:

$m$	-3	-2	-1	0	1	2	3
$x_m$ , дел.	2,05	2,40	2,75	3,10	3,475	3,775	4,125
$x_m$ , мкм	-420	-280	-140	0	150	240	410

3. Для частоты  $\nu_3 = 2,9332 \pm 0,0001$  МГц:

$m$	-2	-1	0	1	2	3
$x_m$ , дел.	1,425	2,30	3,10	3,925	4,80	5,625
$x_m$ , мкм	-670	-320	0	330	680	1010

4. Дальше резонансы получать всё сложнее, к тому же в поле обзора попадает меньше полос либо полосы второго порядка не возникают. Графики по трём точкам строить бессмысленно. Для частоты  $\nu_4 = 4,6086 \pm 0,0001$  МГц:

$m$	-1	0	1
$x_m$ , дел.	1,775	3,10	4,425
$x_m$ , мкм	-530	0	530

5. Для частоты  $\nu_5 = 5,1911 \pm 0,0001$  МГц:

$m$	-1	0	1
$x_m$ , дел.	1,625	3,10	4,60
$x_m$ , мкм	-590	0	600

## Обработка результатов

По составленным таблицам и коэффициентам наклона графика определим для каждой частоты  $k$ , чтобы по формуле (4) рассчитаем длины волн  $\Lambda$  для всех частот.

$\nu$ , МГц	1,0116	1,2092	2,9332	4,6086	5,1911
$k$ , мкм	117,8	136	335	530	595
$\sigma k$ , мкм	0.78	2.48	1.60	0	1.66
$\Lambda$ , мкм	1630	1410	573	362	323
$\Delta\Lambda$ , мкм	50	60	30	13	10

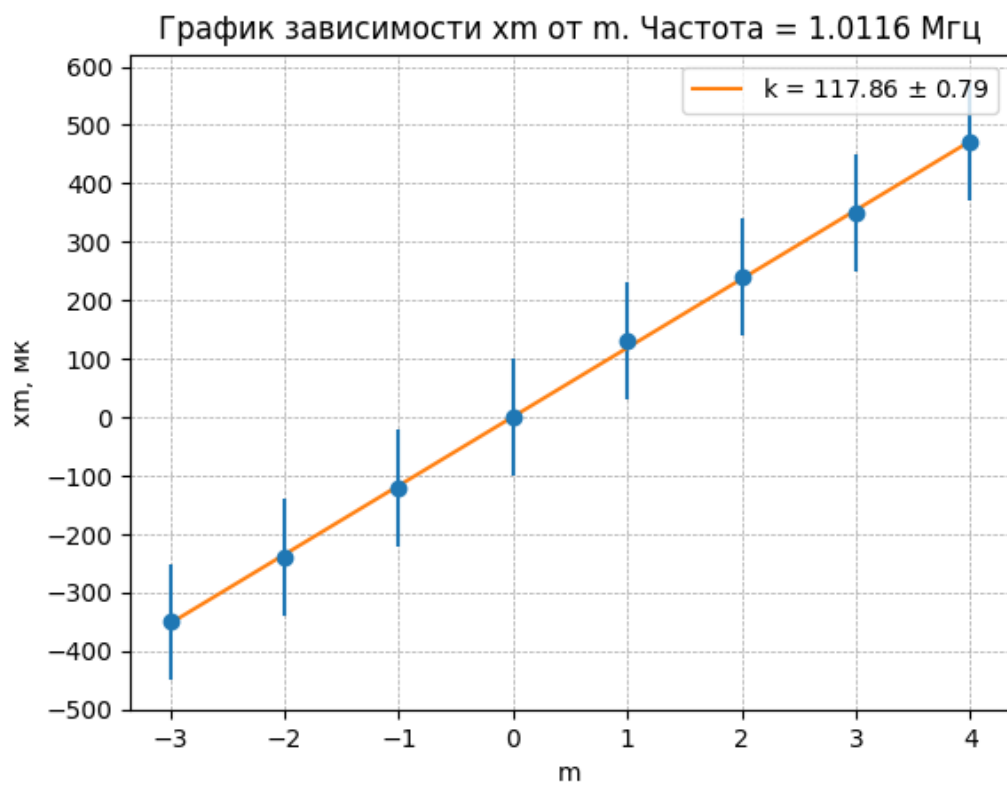


Рис. 3: График зависимости  $x_m(m)$  при  $\nu_1$

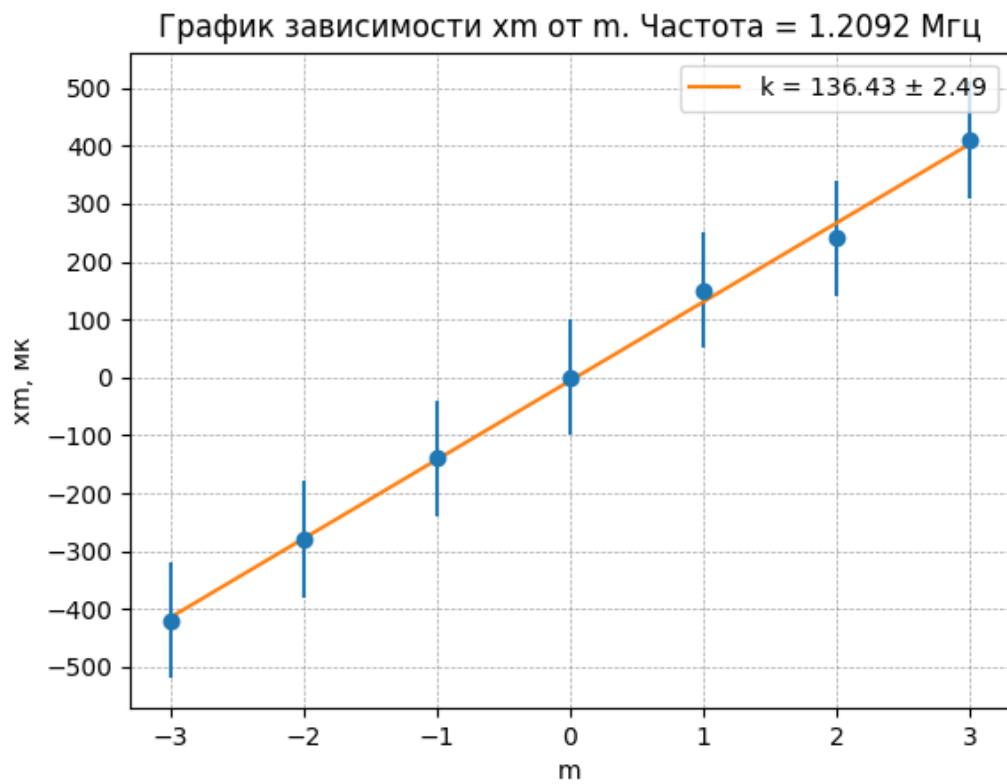


Рис. 4: График зависимости  $x_m(m)$  при  $\nu_2$

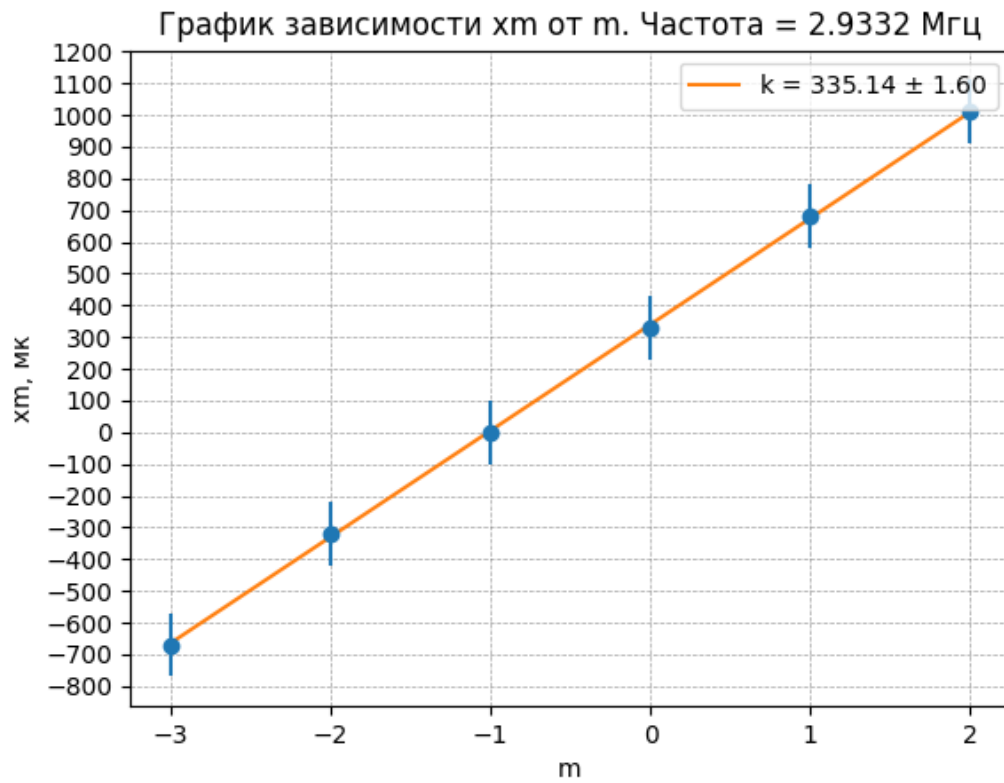


Рис. 5: График зависимости  $x_m(m)$  при  $\nu_3$

Построили график  $\Lambda(1/\nu)$ . По коэффициенту наклона определили скорость ультразвука в воде из формулы (5):

$$v = 1620 \pm 20 \text{ м/с.}$$

Для сравнения табличное значение составляет  $v = 1490 \text{ м/с}$ .

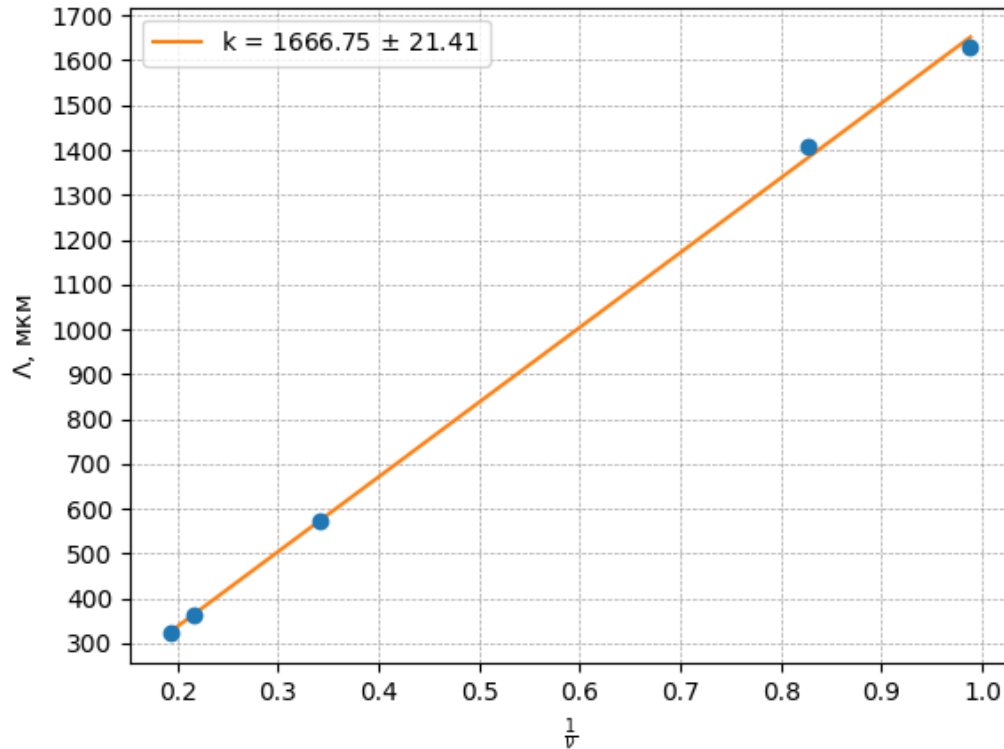


Рис. 6: График зависимости  $\Lambda(\frac{1}{v})$

## Определение скорости ультразвука методом темного поля

Для наблюдения акустической решетки используется метод темного поля, который заключается в устранении центрального дифракционного максимума с помощью непрозрачного экрана.

Приставим к задней стенке (для светового луча) кюветы стеклянную пластинку с миллиметровыми делениями; сфокусируем микроскоп на изображение пластинки. Определим цену деления окулярной шкалы микроскопа, совместив ее с миллиметровыми делениями: в 6 делениях миллиметровой шкалы убирается 100 маленьких делений окулярной. Значит, цена деления окулярной шкалы:  $C = 0,06$  мм.

Без применения метода темного поля звуковая решетка не наблюдается. Закроем нулевой максимум горизонтальной нитью. Таким образом, осевая составляющая фазово-модулированной волны поглощается, а боковые остаются без изменения. Получившееся поле описывается следующим образом:

$$f(x) = \frac{im}{2}e^{i\Omega x} + \frac{im}{2}e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x \quad \text{и} \quad I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x = m^2 \frac{1 + \cos 2\Omega x}{2} \quad (6)$$

Отсюда получаем, что расстояние между темными полосами составляет  $\Lambda/2$ .

Проведем измерение длины ультразвуковой волны, приняв ошибку равной цене деления окулярной шкалы. Формулы для расчета длины волны ультразвука  $\Lambda$  и скорости распространения  $v$  в воде:

$$\Lambda/2 = \frac{NC}{n-1}, \quad v = \nu\Lambda \quad (7)$$

Расчеты также могут быть представлены в таблице, где содержится количество маленьких делений окулярной шкалы  $N$  (цена деления  $C = 0,06$  мм), соответствующее  $n$  темным полосам акустической решетки. Ошибка при таком определении скорости звука больше, чем в первой части работы. Сами значения тоже получились больше.

$\nu$ , МГц	Количество делений шкалы окуляра $N$	Количество темных полос акустической решетки $n$	$\Lambda$ , мм	$v$ , 10 м/с	$\Delta v$ , 10 м/с
1,220	150	15	1,29	157	7
1,259	150	16	1,20	151	8
1,271	175	18	1,24	157	8

Рис. 7: Вычисление длины ультразвуковой волны  $\Lambda$  и скорости распространения ее в воде  $v$  методом темного поля.

## Вывод

В данной работе была исследована дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости. С помощью измерений была определена скорость ультразвука (двумя способами - непосредственно по дифракционной картине и методом тёмного поля). Первый способ позволил достаточно точно определить скорость звука, полученное значение хорошо сошлось с табличным, во втором способе значение получено менее точно из-за больших погрешностей при измерений координат полос, однако всё же сходится с табличным.