

Лабораторная работа 4.3.2  
Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Яковлева Саша, группа 625

25 февраля 2018 г.

**Цель работы:** изучение дифракции света на синусоидальной акустической решетке и наблюдение фазовой решетки методом темного поля.

В работе используются оптическая скамья, осветитель, два длиннофокусных объектива, кювета с жидкостью, кварцевый излучатель с микрометрическим винтом, генератор звуковой частоты, линза, вертикальная нить на рейтере, микроскоп.

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:

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

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

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

$$\varphi = knL = \varphi_0(1 + m \cos \Omega x)$$

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:

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda \quad (1)$$

Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1.

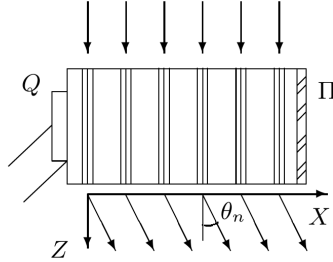


Рис. 1: Дифракция световых волн на акустической решетке

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:

$$\Lambda = m\lambda F/l_m \quad (2)$$

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

$$v = \Lambda\nu \quad (3)$$

# 1 Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

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.

Предварительная настройка установки произведем в соответствии с инструкцией с зеленым фильтром, далее в работе используется красный.

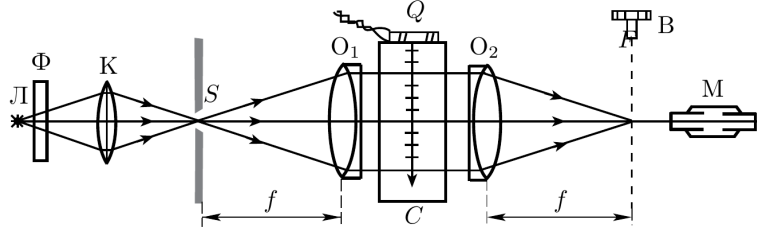


Рис. 2: Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

Параметры установки: фокусное расстояние объектива  $O_2$   $F = 30$  см, одно деление винта микроскопа составляет 4 мкм, погрешность измерений примем равной 2 деления, или 8 мкм.

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

Измерим положения  $x_m$  дифракционных максимумов с помощью микроскопического винта для четырех частот. Результаты измерений занесены в таблицы 1-4 ниже. На основе каждой таблицы построены графики зависимости  $x_m(m)$ , они изображены на рисунках 3-6. Экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую. Проведем ее методом наименьших квадратов. Выражения для коэффициентов прямой  $x_m = bm + a$  с указанием погрешностей:

$$b = \frac{\langle mx_m \rangle - \langle x_m \rangle \langle m \rangle}{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2}$$

$$a = \langle x_m \rangle - b \langle m \rangle$$

$$\sigma_b = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\langle x_m^2 \rangle - \langle x_m \rangle^2}{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2} - b^2}$$

$$\sigma_a = \sigma_b \sqrt{\langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2}$$

Коэффициенты наклона  $b$  для каждой прямой занесены в сводную таблицу 5, содержащую вычисления длины ультра-звуковой волны  $\Lambda$  и скорости ее распространения в воде  $v$  по формулам (2), (3) с учетом выражения:

$$b = l_m/m \rightarrow \Lambda = \lambda F/b$$

Относительную погрешность определения длины волны  $\Lambda$  будем считать равной относительной погрешности определения коэффициента наклона прямой  $b$ .

|             |      |      |      |   |     |     |     |
|-------------|------|------|------|---|-----|-----|-----|
| $m$         | -3   | -2   | -1   | 0 | 1   | 2   | 3   |
| $x_m$ , дел | -115 | -78  | -37  | 0 | 38  | 74  | 106 |
| $x_m$ , мкм | -460 | -312 | -148 | 0 | 152 | 296 | 424 |

Таблица 1: Измерение координаты  $m$ -ого максимума  $x_m$  дифракционной картины при частоте генератора  $\nu = 1,168$  МГц

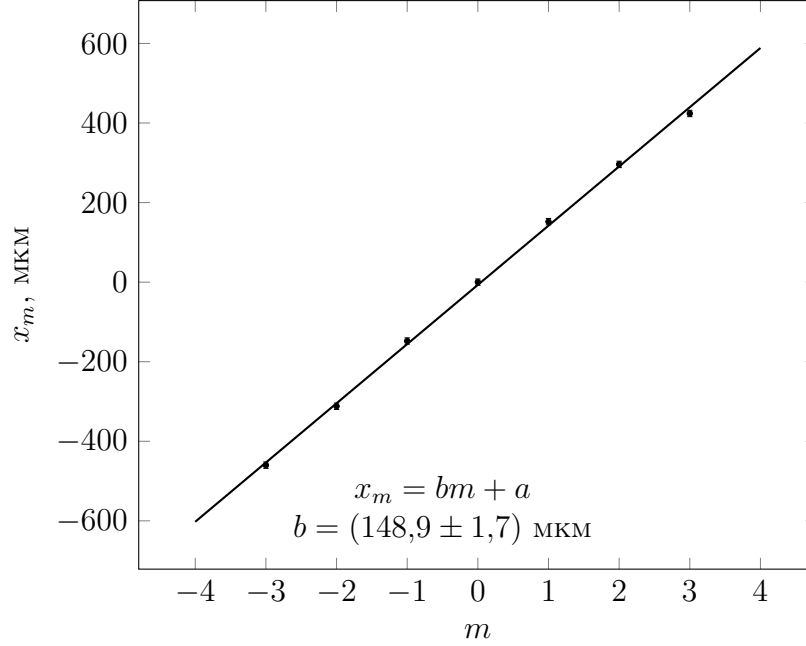


Рис. 3: График зависимости  $x_m(m)$  при частоте генератора  $\nu = 1,168$  МГц

|             |      |      |      |      |   |     |     |     |     |
|-------------|------|------|------|------|---|-----|-----|-----|-----|
| $m$         | -4   | -3   | -2   | -1   | 0 | 1   | 2   | 3   | 4   |
| $x_m$ , дел | -150 | -116 | -81  | -38  | 0 | 38  | 80  | 120 | 154 |
| $x_m$ , мкм | -600 | -464 | -324 | -152 | 0 | 152 | 320 | 480 | 616 |

Таблица 2: Измерение координаты  $m$ -ого максимума  $x_m$  дифракционной картины при частоте генератора  $\nu = 1,219$  МГц

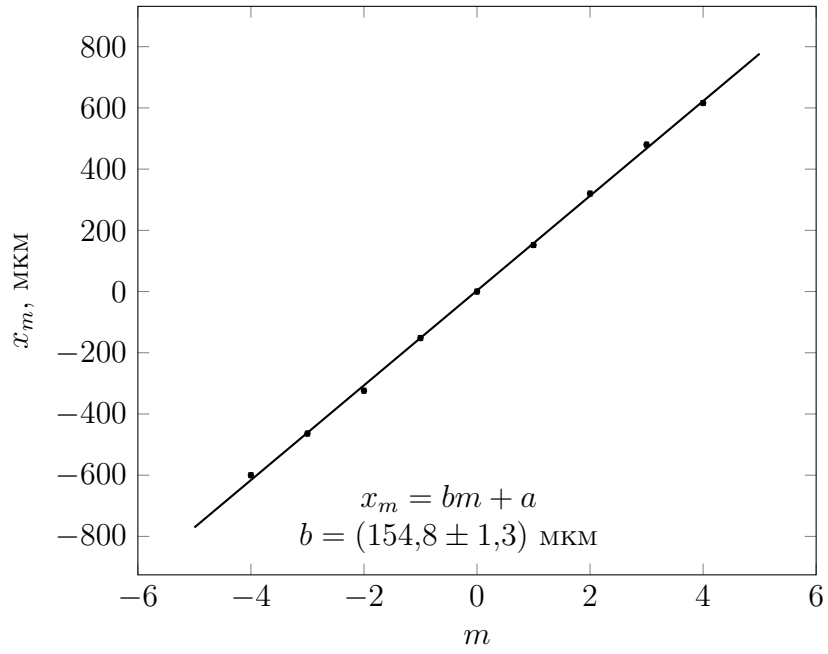


Рис. 4: График зависимость  $x_m(m)$  при частоте генератора  $\nu = 1,168 \text{ МГц}$

| $m$         | -3   | -2   | -1   | 0 | 1   | 2   | 3   |
|-------------|------|------|------|---|-----|-----|-----|
| $x_m$ , ДЕЛ | -116 | -80  | -38  | 0 | 45  | 86  | 126 |
| $x_m$ , МКМ | -464 | -320 | -152 | 0 | 180 | 344 | 504 |

Таблица 3: Измерение координаты  $m$ -ого максимума  $x_m$  дифракционной картины при частоте генератора  $\nu = 1,258 \text{ МГц}$

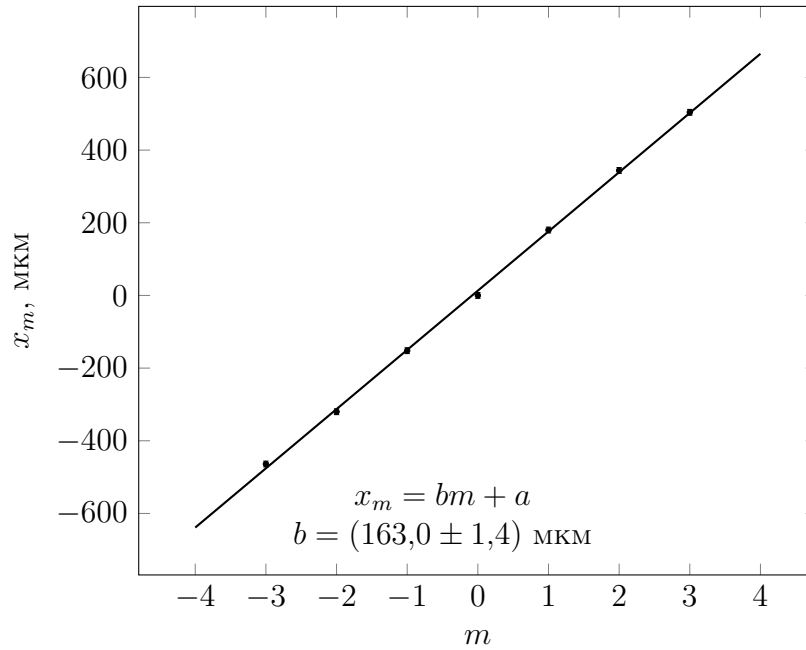


Рис. 5: График зависимость  $x_m(m)$  при частоте генератора  $\nu = 1,258 \text{ МГц}$

|             |      |      |   |     |     |
|-------------|------|------|---|-----|-----|
| $m$         | -2   | -1   | 0 | 1   | 2   |
| $x_m$ , дел | -94  | -43  | 0 | 45  | 85  |
| $x_m$ , мкм | -376 | -172 | 0 | 180 | 340 |

Таблица 4: Измерение координаты  $m$ -ого максимума  $x_m$  дифракционной картины при частоте генератора  $\nu = 1,331$  МГц

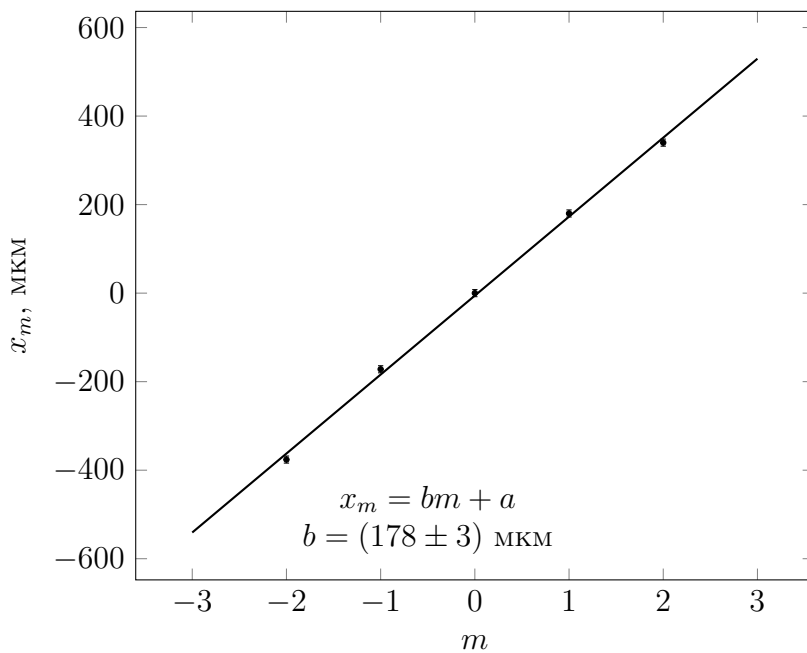


Рис. 6: График зависимость  $x_m(m)$  при частоте генератора  $\nu = 1,331$  МГц

| $\nu$ , МГц | $b$ , мкм | $\sigma_b$ , мкм | $\Lambda$ , мкм | $\Delta\Lambda$ , мкм | $v$ , м/с | $\Delta v$ , м/с |
|-------------|-----------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------|------------------|
| 1,168       | 148,9     | 1,7              | 1289            | 15                    | 1507      | 17               |
| 1,219       | 154,8     | 1,3              | 1240            | 10                    | 1512      | 12               |
| 1,258       | 163,0     | 1,4              | 1178            | 10                    | 1482      | 13               |
| 1,331       | 178       | 3                | 1076            | 19                    | 1432      | 26               |

Таблица 5: Вычисление длины ультразвуковой волны  $\Lambda$  и скорости распространения ее в воде  $v$

Ошибка при определении  $\Lambda$  и  $v$  не превышает 2%. Согласно справочным данным, при комнатной температуре скорость ультразвуковой волны в воде составляет примерно 1490 м/с. Значения, полученные экспериментально, с достаточной точностью соотносятся с ними.

По таблице 5 видно, что длина волны и скорость распространения падает с ростом частоты излучения...

ПОЧЕМУ???

## 2 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. Схема установки показана на рисунке 7.

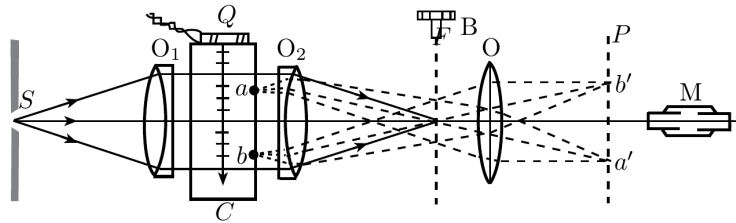


Рис. 7: Схема для наблюдения акустической решетки методом темного поля

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 вертикальной нитью. Таким образом осевая составляющая фазово-модулированной волны поглощается, а боковые остаются без изменения. Получившееся поле:  $f(x) = \frac{im}{2}e^{i\Omega x} + \frac{im}{2}e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x$ , интенсивность изменяется по закону:  $I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x = \frac{1+\cos 2\Omega x}{2} \cdot m^2$ . Отсюда получаем, что расстояние между темными полосами есть  $\Lambda/2$ .

Проведем измерение длины ультра-звуковой волны, приняв ошибку равной цене деления окулярной шкалы. В таблице 6 содержатся количество маленьких делений окулярной шкалы  $N$  (цена деления  $C = 0,06$ ), соответствующее  $n$  темным полосам акустической решетки. Формулы для расчета длины волны ультразвука  $\Lambda$  и скорости распространения  $v$  в воде:

$$\Lambda/2 = NC/(n - 1)$$

$$v = \nu \Lambda$$

Расчеты также приведены в таблице 6.

Ошибка при таком определении скорости звука больше, чем в первой части работы, и составляет около 5%. 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                   |

Таблица 6: Вычисление длины ультразвуковой волны  $\Lambda$  и скорости распространения ее в воде  $v$  методом темного поля

**Вывод:** в работе изучена дифракция света на акустической решетки, рассчитаны длина волны ультразвука и скорость его распространения в воде. Решетка наблюдалась методом темного поля.