

Работа 4.3.2

Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Стрижак Даниил

1 Аннотация

В работе изучается дифракция света на синусоидальной акустической решетке и наблюдается фазовая решетка методом темного поля.

С помощью оптической скамьи, осветителя, двух длиннофокусных объективов, кюветы с жидкостью, кварцевого излучателя с микрометрическим винтом, генератора звуковой частоты, линзы, вертикальной нити на рейтере и микроскопа.

2 Теоретические сведения

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.

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:

$$n = n_0(1 + m \cos \Omega x) \quad (2.1)$$

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

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

$$\phi = knL = \phi_0(1 + m \cos \Omega x) \quad (2.2)$$

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 θ , соответствующими максимумам в дифракции Фраунгофера:

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda \quad (2.3)$$

Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1.

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

$$\Lambda = m\lambda F/l_m \quad (2.4)$$

Скорость ультразвуковых волн в жидкости, где ν — частота колебаний излучателя:

$$v = \Lambda\nu \quad (2.5)$$

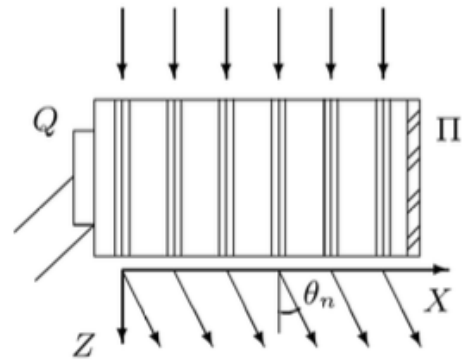


рис. 1. Дифракция световых волн на акустической решетке

3 Результаты измерений и обработка данных

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.

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

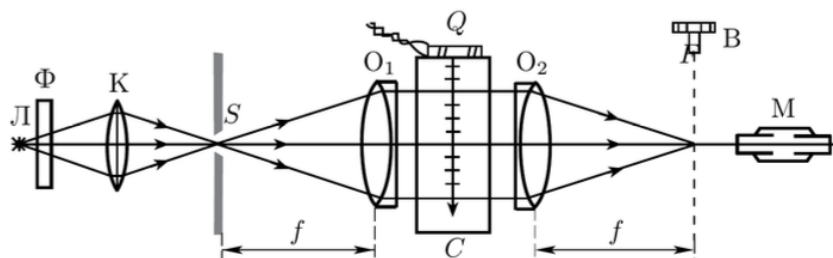


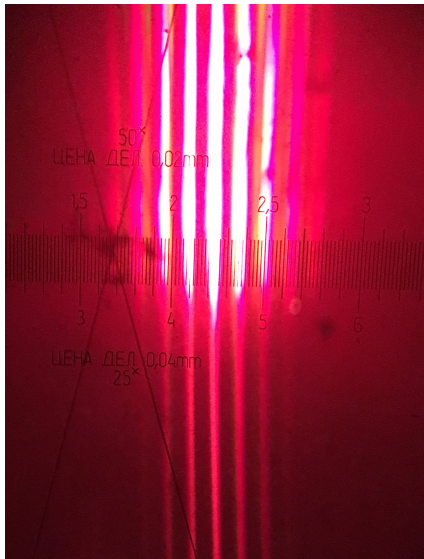
рис. 2. Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

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

Исследуем изменения дифракционной картины на зеленом свете. При увеличении частоты УЗ-генератора и приближении к 1,17 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. Коэффициенты углов наклонов прямых для всех зависимостей сведены в таблицу 5.



Полученная картина

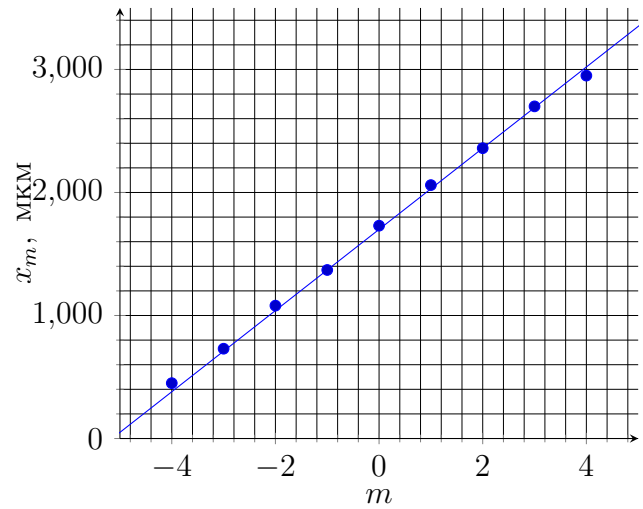
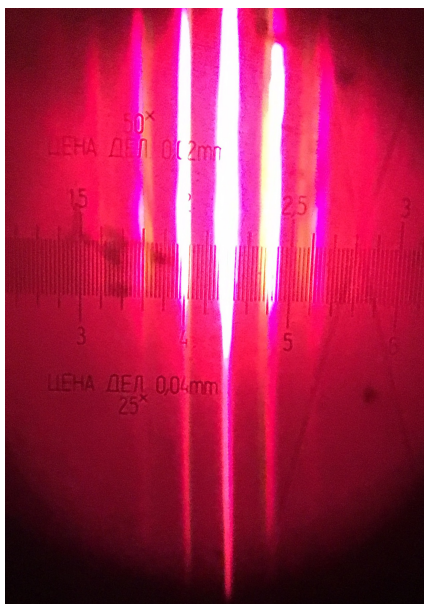


График зависимости $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,17$ МГц

m	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
x_m , МКМ	450	730	1080	1370	1730	2060	2360	2700	2950

Таблица 1. Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,17$ МГц



Полученная картина

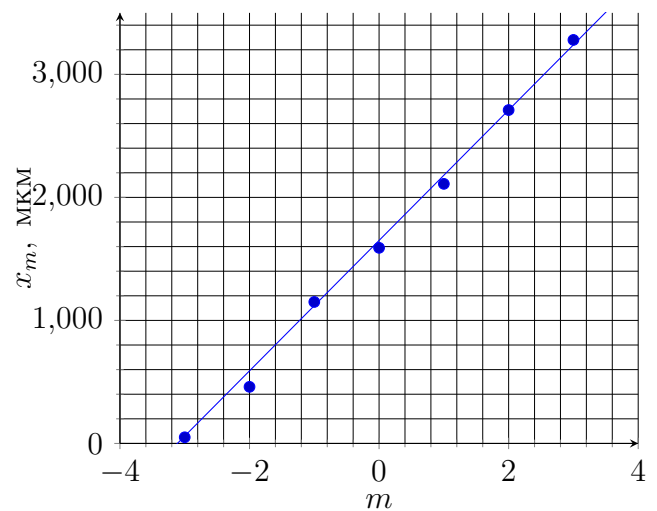
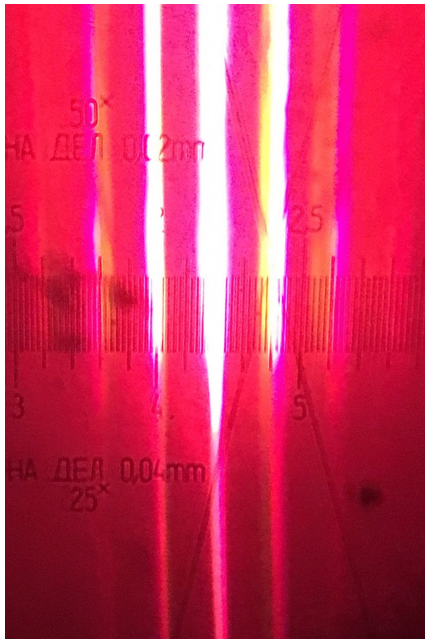


График зависимости $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,82$ МГц

m	-3	-2	-1	0	1	2	3
x_m , МКМ	50	460	1150	1590	2110	2710	3280

Таблица 2. Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,82$ МГц



Полученная картина

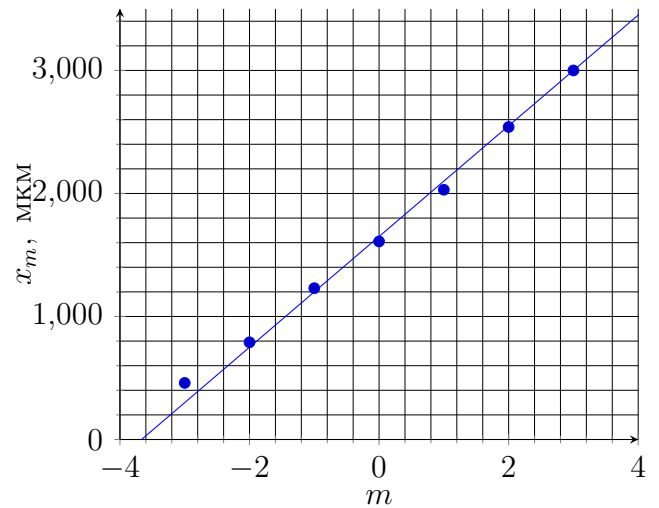
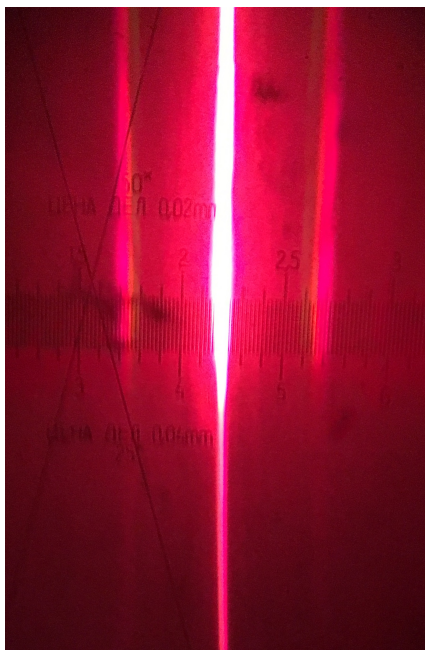


График зависимости $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,55$ МГц

m	-3	-2	-1	0	1	2	3
x_m , МКМ	460	790	1230	1610	2030	2540	3000

Таблица 3. Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,55$ МГц



Полученная картина

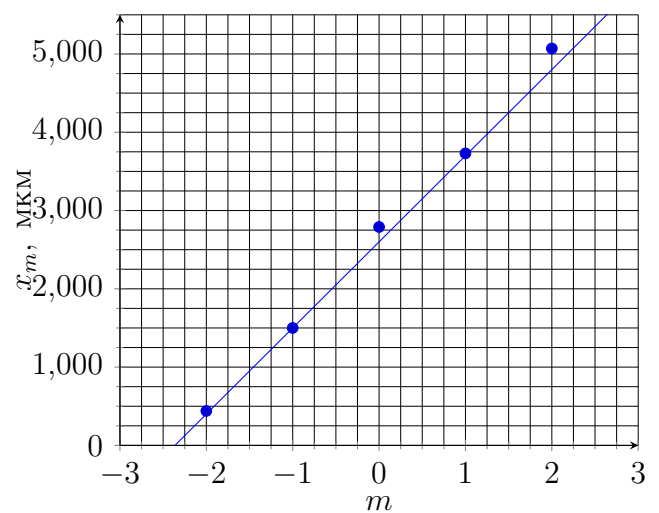


График зависимости $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 3,96$ МГц

m	-2	-1	0	1	2
x_m , МКМ	440	1500	2790	3730	5070

Таблица 4. Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 3,96$ МГц

Из зависимости наклона графиков от частоты рассчитаем скорость звука в воде по формулам (2.4) и (2.5). Откуда получаем, что скорость звука равна

$$1513 \pm 35 \text{ м/с},$$

что соответствует табличным данным в пределах погрешности измерений и эксперимента – 1490 м/с.

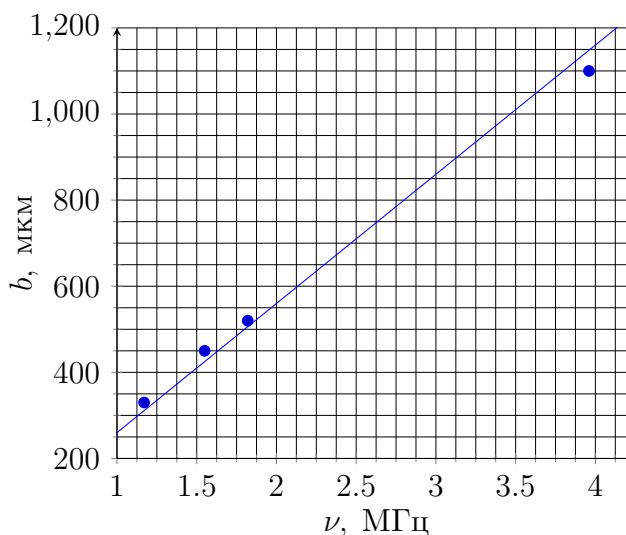


График зависимости $b_m(\nu)$

4 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.

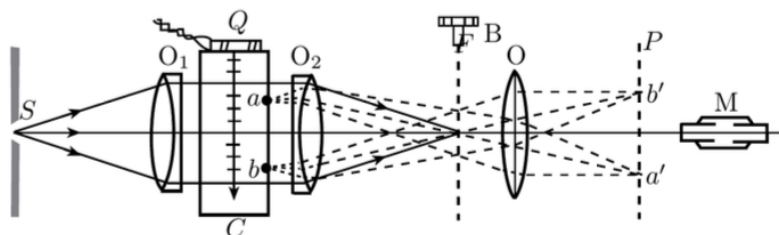


Схема для наблюдения дифракции методом темного поля

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 1 делении миллиметровой шкалы убирается 1 большое деление окулярной. Значит, цена деления окулярной шкалы: $C = 1 \text{ мм}$.

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:

$$f(x) = \frac{im}{2}e^{i\Omega x} + \frac{im}{2}e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x = m^2 \frac{1 + \cos^2 2\Omega x}{2} \quad (4.1)$$

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

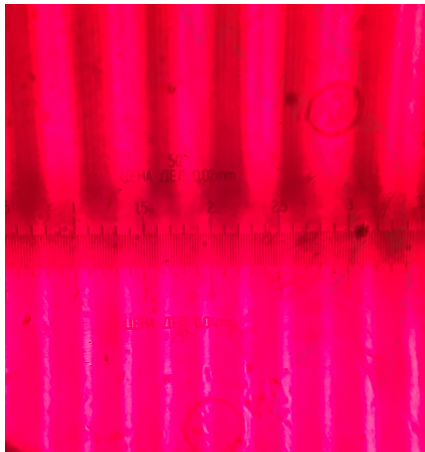
Проведем измерение длины ультразвуковой волны, приняв ошибку равной цене деления окулярной шкалы. В таблице 6 содержится количество маленьких делений окулярной шкалы N (цена деления $C = 1$), соответствующее n темным полосам акустической решетки. Формулы для расчета длины волны ультразвука Λ и скорости распространения v в воде:

$$\Lambda/2 = NC/(n - 1), \quad v = \nu\Lambda \quad (4.2)$$

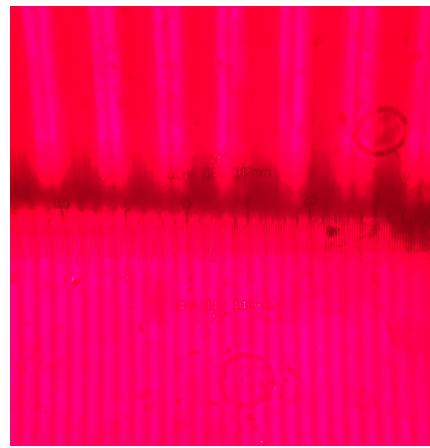
Картины наблюдения получились на другой установке, и только при частотах $\nu_1 = 1.22$ МГц и $\nu_2 = 2.97$ МГц, с помощью этих данных можно определить скорость звука и длину волны.

В первом случае: $\Lambda = 1.29 \pm 0.04$ мм и $v = 1570 \pm 60$ м/с.

Во втором случае: $\Lambda = 0.53 \pm 0.04$ мм и $v = 1510 \pm 60$ м/с



Наблюдаемая картина при частоте
1.22 МГц



Наблюдаемая картина при частоте
2.97 МГц

5 Вывод

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

Ошибка при определении Λ 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.

Ошибка при таком определении скорости звука больше, чем в первой части работы, и составляет около 5%. Сами значения тоже получились больше.