

Лабораторная работа 4.3.2  
ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА  
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЕ В ЖИДКОСТИ  
А. Установка с вертикальной щелью

Аксенова Светлана

11 марта 2021 г.

**Цель работы:** изучение дифракции света на синусоидальной акустической решётке и наблюдение фазовой решётки методом тёмного поля.

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

## 1 Теоретическое введение

В работе изучается дифракция света на фазовой решётке, которая создаётся в жидкости ультразвуковыми (УЗ) волнами и наблюдается методом тёмного поля. При прохождении УЗ-волны через жидкость в ней возникают периодические оптические неоднородности, обусловленные разницей значений коэффициента преломления в областях сжатия и растяжения. Они играют роль своеобразной дифракционной решётки для проходящего сквозь жидкость света.

Пусть УЗ-волна распространяется вдоль оси  $X$  (рис. 1) в жидкости, налитой в стеклянную кювету. В направлении оси  $Z$  сквозь жидкость проходит световая волна, испытывающая дифракцию на акустической решётке, которую можно считать неподвижной, т.к. скорость света значительно больше скорости звука. Вызванное ультразвуком возмущение показателя преломления жидкости в нашем случае очень мало. При этом мы предполагаем, что акустическую решётку можно рассматривать как тонкий фазовый экран.

При небольших амплитудах звуковой волны показатель преломления жидкости  $n$  меняется по закону

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

где  $\Omega$  - волновое число для УЗ-волны ( $\Omega = 2\pi/\Lambda$ ),  $\Lambda$  - длина УЗ-волны,  $m$  - глубина модуляции показателя преломления, определяемая интенсивностью ультразвуковой волны ( $m \ll 1$ ).

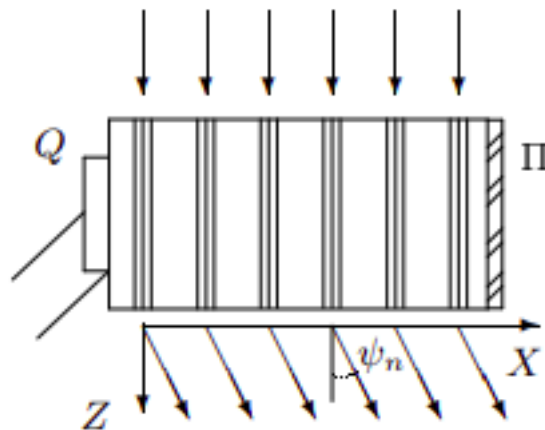


Рисунок 1 – Дифракция световых волн на акустической решётке

Пусть фаза световых колебаний на передней поверхности жидкости равна нулю. Тогда на задней поверхности (т.е. в плоскости  $z = 0$ ) она равна

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

где  $L$  - толщина слоя жидкости в кювете,  $k$  - волновое число для света ( $k = 2\pi/\lambda$ ),  $\lambda = 6400 \pm 200 \text{ \AA}$  - длина световой волны (красный цвет),  $\phi_0 = kn_0L$ . Таким образом, УЗ-волна в жидкости создаёт фазовую дифракционную решётку.

Условие тонкого транспоранта

$$m \ll \frac{\Lambda}{L} \sqrt{\frac{\lambda}{L}} \quad (3)$$

Следовательно, чисто фазовая акустическая решётка реализуется лишь на достаточно слабой УЗ-волне. При повышении мощности ультразвука акустическая волна начинает работать как сложная амплитудно-фазовая решётка.

После прохождения через кювету световое поле представляет совокупность не трёх, а большего числа плоских волн, распространяющихся под углами, определяемые условием

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (4)$$

Каждая из этих волн соответствует одному из максимумов в дифракционной картине Фраунгофера.

Тогда, зная частоту ультразвуковой волны, можно определить скорость звука по формуле

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

Рассматриваемая теория применима как для бегущих, так и для стоячих УЗ-волн.

## 2 Определение скорости звука по дифракционной картине

Схема установки для наблюдения дифракции света на УЗ-волнах изображена на рис. 2. В фокальной плоскости второго объектива  $O_2$  образуется дифракционная картина, наблюдаемая при помощи микроскопа  $M$ . При этом обязательно применяют монохроматическое излучение (красный светофильтр).

Длина  $\Lambda$  ультразвуковой волны определяется с помощью формулы (4); в силу малости углов  $\theta_m$  окончательное выражение может быть представлено в виде

$$l_m = mf \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad (6)$$

где  $l_m$  - измеренное на опыте линейное расстояние между  $m$ -м максимумом и нулевым максимумом, а  $f = 30 \text{ см} \pm 1 \text{ см}$  - фокусное расстояние объектива.

Изменениями ширины щели  $S$  были получены оптимальные условия для наблюдения дифракционных полос. Было получено, что при увеличении мощности ультразвука число полос уменьшилось с семи до одного, при уменьшении число полос уменьшилось до трёх.

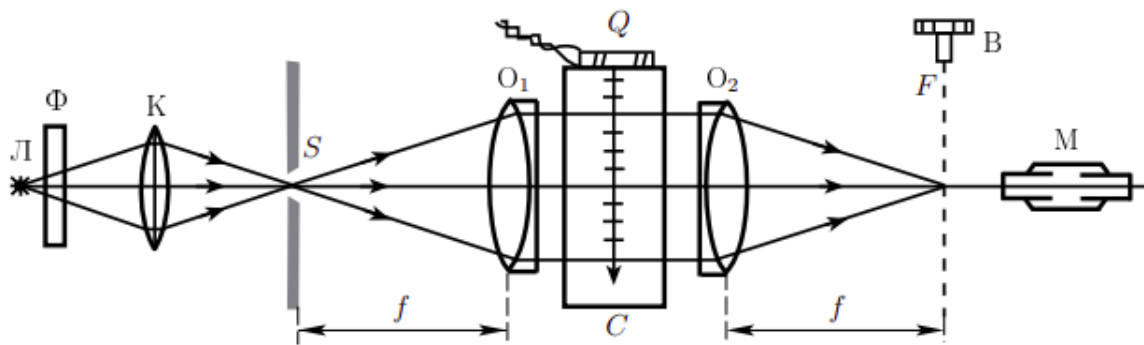


Рисунок 2 – Схема наблюдения дифракции на акустической решётке

$\nu$ , МГц	$l_m/m$ , мм	$\Lambda$ , мм	$v$ , м/с
$1,20 \pm 0,01$	$0,157 \pm 0,006$	$1,22 \pm 0,07$	$1469,5 \pm 88,9$
$3,00 \pm 0,01$	$0,405 \pm 0,005$	$0,474 \pm 0,022$	$1422,2 \pm 67,3$
$2,00 \pm 0,01$	$0,285 \pm 0,018$	$0,67 \pm 0,05$	$1347,4 \pm 106,3$
$1,00 \pm 0,01$	$0,1380 \pm 0,0009$	$1,39 \pm 0,06$	$1391,3 \pm 64,2$
$v_{\text{ср}} = 1407,6 \pm 102,9$ м/с			

Таблица 1 – Результаты проведённых расчётов для четырёх выбранных частот

Оценим с помощью микрометрического винта излучателя длину звуковой волны как удвоенное расстояние между двумя наиболее чёткими дифракционными картинами и рассчитаем длину волны

$$\Lambda = 1,30 \pm 0,1 \text{ мм.}$$

По показаниям частотомера была определена рабочая частота

$$\nu = 1,20 \pm 0,01 \text{ МГц.}$$

Оценим скорость звука по формуле (5)

$$v = 1560 \pm 17 \text{ м/с.}$$

Далее были измерены положения дифракционных максимумов  $x_m$  для нескольких частот, для каждой из которых был построен график зависимости  $x_m(\pm m)$ . Была проведена аппроксимация методом наименьших квадратов (рис. 3). По наклону прямой для каждой частоты было определено расстояние между соседними полосами  $l_m/m = \Delta x_m / \Delta m$ , по формуле (6) рассчитана длина волны  $\Lambda$  и скорость ультразвука по формуле (5). Результаты представлены в таблице 1. Справочная величина, взятая из [1] для температуры 20°C

$$v_{\text{табл}} = 1484 \text{ м/с.}$$

Результат, полученный экспериментально, отличается от данных справочника на 16,2%.

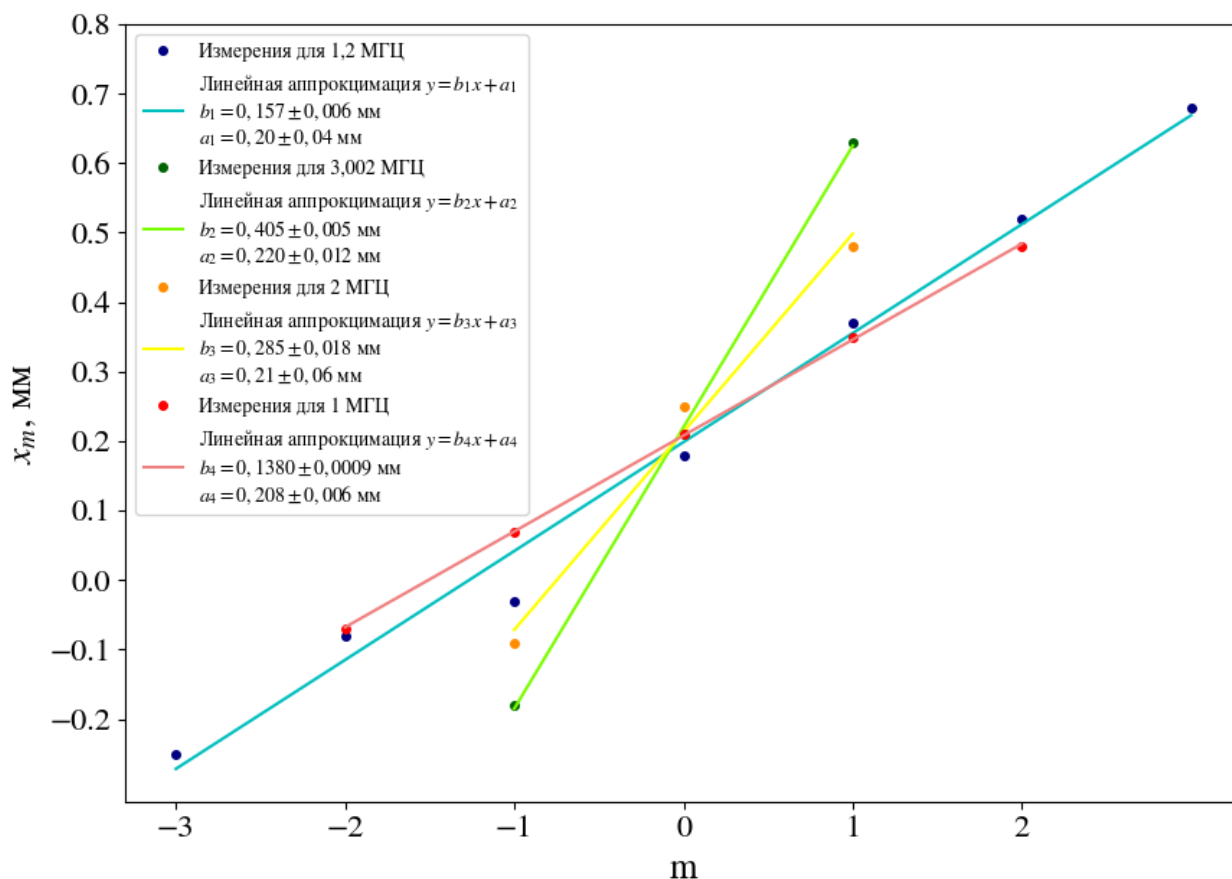


Рисунок 3 – График зависимости  $x_m(\pm m)$  для выбранных частот

### 3 Определение скорости ультразвука методом тёмного поля

Схема установки для наблюдения акустической решётки методом тёмного поля представлена на рис. 4. Этот опыт можно проводить только со стоячими волнами, т.к. в случае бегущей волны визуальное наблюдение оказывается невозможным, глаз не успевает следить за быстро перемещающейся волной.

Для перехода к методу тёмного поля в поле зрения микроскопа с помощью микрометрического винта была введена вертикальная проволочка: резкое изображение нити должно совпадать с резким изображением щели. После этого ставят дополнительную линзу между микроскопом и отсчётным устройством. Пластика с миллиметровыми делениями была опущена в воду и прижата к задней (по ходу лучей) стенке кюветы. Была определена цена деления окулярной шкалы: 1 мм = 18 делений. После калибровки микроскоп не сдвигался.

Далее центральный максимум был закрыт вертикальной нитью. Тогда в поле зрения микроскопа наблюдались чередующиеся светлые и тёмные полосы, причём расстояние между тёмными полосами соответствует смещению в плоскости кюветы на  $\Lambda/2$ . Таким образом, долго наблюдаться характерное для метода тёмного поля удвоение числа деталей рассматриваемой структуры.

В ходе эксперимента было измерено расстояние между самыми дальними из

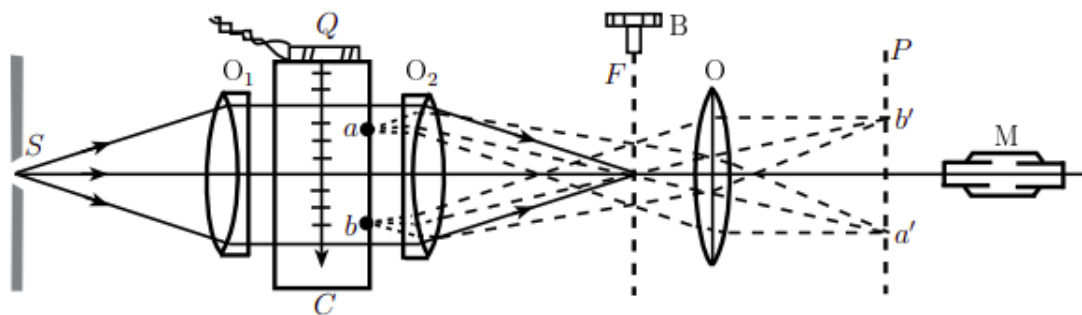


Рисунок 4 – Наблюдение акустической решётки методом тёмного поля

$\nu$ , МГц	Число делений	Число промежутков	$\Lambda$ , мм	$v$ , м/с
$1,07 \pm 0,01$	200	10	$1,11 \pm 0,11$	$1188,89 \pm 0,1$
$1,26 \pm 0,01$	120	7	$0,95 \pm 0,14$	$1200 \pm 0,14$
$1,19 \pm 0,01$	120	7	$0,95 \pm 0,14$	$1133,33 \pm 0,14$
$1,02 \pm 0,01$	160	8	$1,11 \pm 0,14$	$1133,333 \pm 0,12$
$v_{\text{ср}} = 1163 \pm 71$				

Таблица 2 – Результаты проведённых расчётов для четырёх выбранных частот для метода тёмного поля

хорошо видимых в поле зрения тёмных полос и посчитано число промежутков между ними для нескольких значений частот. Для каждой частоты были рассчитаны длина УЗ-волны и скорость звука, результаты представлены в таблице 2. Полученный результат совпадает по порядку величины с данными, полученными в прошлых пунктах и с табличной величиной.

#### 4 Вывод

В ходе работы было изучено явление дифракции света на синусоидальной акустической решётке, была проведена оценка и расчёт скорости звука в воде. Также скорость звука в воде была рассчитана с помощью метода тёмного поля.

## 5 Список литературы

1. Лабораторный практикум по общей физике: учеб. пособие. В трёх томах. Т.2. Оптика / А. В. Максимычев, Д. А. Александров, Н. С. Берюлёв и др.; под ред. А. В. Максимычева. - М.: МФТИ, 2014. - 446 с.

## 6 Приложение

[Ссылка на данные и их обработку](#)