

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

# Отчёт о выполнении лабораторной работы

## 4.3.2

Дифракция света на ультразвуковой волне в  
жидкости

Соболевский Федор Александрович  
Старокожко Иван Георгиевич  
Б05-111

Март 2023

# 1 Аннотация

В данной работе исследование явление дифракции света на фазовой решётке, возникающей вследствие малых изменений коэффициента преломления жидкости при прохождении через неё ультразвуковых волн. Также проведено наблюдение возникающей фазовой решётки методом тёмного поля. По результатам измерений параметров возникающих дифракционных картин экспериментально вычислена скорость УЗ-волн в воде. На основе табличного значения данной величины дана оценка точности эксперимента.

## 2 Теоретические сведения

В данной работе исследовано явление *дифракции* – отклонений в распространении света от законов геометрической оптики – на фазовой решётке, то есть в среде, осуществляющей периодическую модуляцию падающей волны света по фазе за счёт периодического изменения толщины и/или показателя преломления. В нашей работе рассмотрена дифракция на синусоидальной фазовой решётке в воде. При прохождении ультразвуковой волны через жидкость в ней возникают периодические неоднородности коэффициента преломления, и таким образом 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  $\theta_m$ , соответствующими максимумам в дифракции Фраунгофера:

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

Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1.

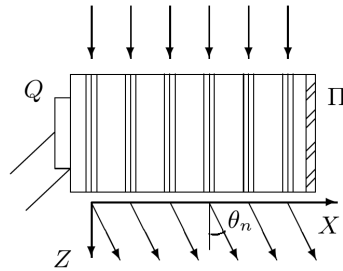


Рис. 1: Дифракция световых волн на акустической решетке

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:

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

Стоит сформулировать качественный критерий, при выполнении которого можно считать акустическую решётку чисто фазовой, т. е. рассматривать её как тонкий фазовый экран. Для нашей задачи условие тонкого транспаранта можно записать в виде

$$m \ll \frac{\Lambda}{L} \sqrt{\frac{\lambda}{L}}.$$

В настоящей работе помимо дифракционного метода определения длины волны ультразвука используется способ получения видимого изображения акустической решётки — метод тёмного поля, основанный на устранении центрального дифракционного максимума с помощью специального экрана. Как нетрудно показать, в поле зрения микроскопа будут наблюдаться чередующиеся светлые и тёмные полосы, причём расстояние между тёмными полосами соответствует смещению в плоскости кюветы на  $\Lambda/2$ . Таким образом, должно наблюдаться характерное для метода тёмного поля удвоение числа деталей рассматриваемой структуры.

### 3 Ход работы, результаты

#### 3.1 Описание установки

В нашем случае установка оборудована «горизонтальной щелью». Ее схема представлена на рис. 2. Свет от источника Л проходит через красный монохроматический фильтр, фокусируется коллиматором К на щели S. После этого пучок становится параллельным, проходя линзу  $O_1$ . дифракцияагируя в кювете, он вновь попадает на собирающую линзу  $O_2$ , фокусируясь в плоскости наблюдения микроскопа.

В кювету погружен генератор УЗ волн, глубина погружения регулируется микрометрическим винтом, частота — генератором переменного тока и частотомером. Изменяя частоту, установлена четкая дифракцияакционная картина в поскости винта, что соответствует генерации стоячей волны в кювете. дифракцияакционные полосы ориентированы горизонтально. Расстояние между ними измеряется микрометрическим винтом В.

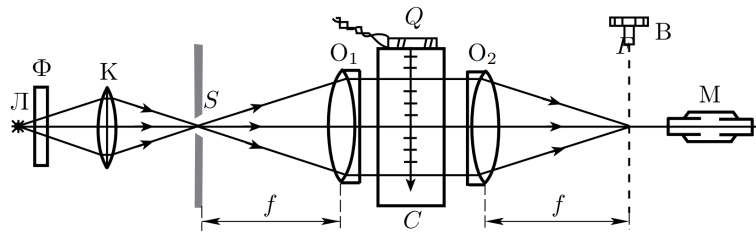


Рис. 2: Схема установки для наблюдения дифракции на акустической фазовой решетке.

#### 3.2 Оценка скорости ультразвука по дифракционной картине

Оценить длину УЗ-волны в воде можно как удвоенное расстояние между соседними положениями УЗ-излучателя, соответствующими наиболее чёткими дифракционными картинами. Полученные предварительно оценочные значения:

$$\begin{aligned}x_1 &= (1370 \pm 5) \text{ мкм}, \\x_2 &= (242 \pm 5) \text{ мкм}, \\ \lambda &\approx 2 \cdot (x_2 - x_1) = (2260 \pm 10) \text{ мкм}.\end{aligned}$$

Рабочая частота генератора в оценочном опыте:  $\nu = (1,132 \pm 0,001)$  МГц. Таким образом, оценка скорости звука:

$$v \approx \lambda \cdot \nu = (2490 \pm 40) \text{ м/с}.$$

Полученное значение сходится по порядку с табличным значением в приблизительно 1500 м/с.

#### 3.3 Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

Используя соотношение 2, по координатам дифракцияакционных полос определим скорость УЗ-волн в воде. Положение полос определены при помощи микрометрического винта. Длина волны красного света:  $\lambda = (640 \pm 20) \text{ нм}$ . Фокусное расстояние линзы:  $F = 30 \text{ см}$ . Результаты измерений и расчетов представлены в таблице и графике 1.

Среднее значение скорости звука:  $v = (1460 \pm 30) \text{ м/с}$ . Согласно справочным данным, при комнатной температуре скорость УЗ-волны в воде составляет около 1490 м/с, отклонение полученного значения  $\approx 2,3\%$ .

$\nu$ , МГц	$x_{-3}$	$x_{-2}$	$x_{-1}$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$l_1$	$v$ , м/с
1,133	-344	-216	-72	56	200	336	480	123	1651
0,988	-308	-176	-64	56	184	308	428	122	1451
1,074	-324	-204	-68	56	196	332	460	132	1458
1,163	-372	-220	-76	56	204	348	496	144	1447
1,226	—	-232	-88	56	212	368	—	150	1465

### 3.4 Определение скорости ультразвука методом тёмного поля

Для данной части опыта между микроскопом и щелью установлена дополнительная линза  $O$ . При помощи калибровочной сетки была рассчитана цена деления окулярной шкалы микроскопа —  $1_{\text{дел}} \sim \frac{1_{\text{мм}}}{22}$ .

Уменьшая частоту УЗ-волн, получена решетка, которую нельзя увидеть при открытом центральном максимуме, но видно, если закрыть последний проволочкой (см. метод темного поля). При этом полученная решетка не является сложной амплитудно-фазовой, так как возмущения жидкости малы и однородны.

При помощи окулярной шкалы микроскопа определены координаты первой и последней из хорошо видимых в поле зрения тёмных полос и число светлых промежутков между ними. Измерения проведены для нескольких частот, результаты в таблице. Расстояние между полосами соответствует половине длины волны.

$\nu$ , МГц	$x_0$ , дел	$x_1$ , дел	$n$	$l_1$ , мм	$\Lambda$ , мм	$v$ , м/с
1.827	23	137	13	0.399	0.797	1456
2.02	11	123	14	0.364	0.727	1469
1.574	17	118	10	0.459	0.918	1445
1.359	8	125	10	0.532	1.064	1445
1.141	2	129	9	0.641	1.283	1464
0.959	10	130	7	0.779	1.558	1495

Среднее значение скорости —  $v = (1460 \pm 23)$  м/с. Отклонение от табличного значения составляет  $\approx 1,9\%$ .

## 4 Выводы

В работе установлено, что дифракционные методы на акустической фазовой решетке позволяют весьма точно определять параметры УЗ-волн, распространяющихся в воде. Метод тёмного поля оказался несколько более точным: в первом эксперименте отклонение от табличного значения составило 2,3%, во втором — 1,9%. Относительно небольшие значения погрешностей позволяют утверждать:

- Используемые при выводе применённых формул приближения мало влияют на точность расчётов;
- На акустической решётке действительно наблюдается дифракция Фраунгофера;
- Акустическую решётку в данном эксперименте корректно считать чисто фазовой.

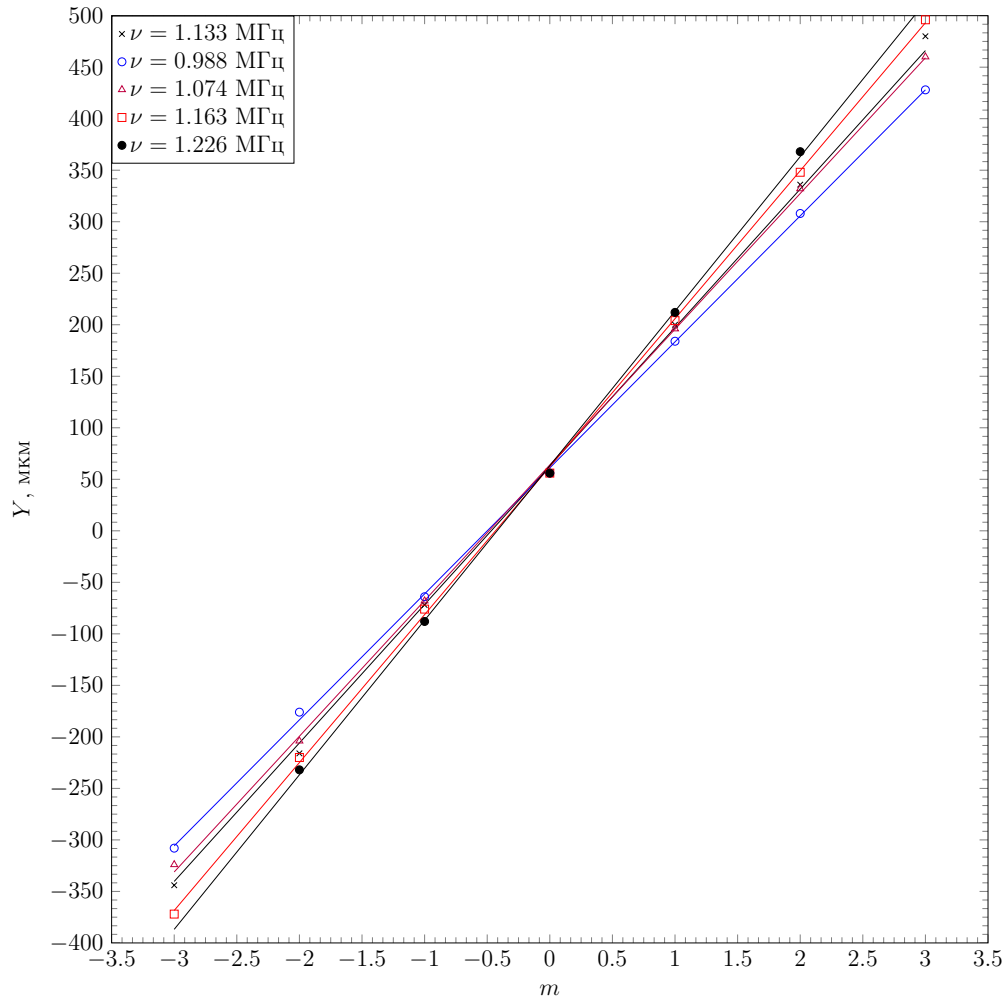


Рис. 3: Графики зависимости координат  $Y$  полос от их номера  $m$  при разных частотах  $\nu$

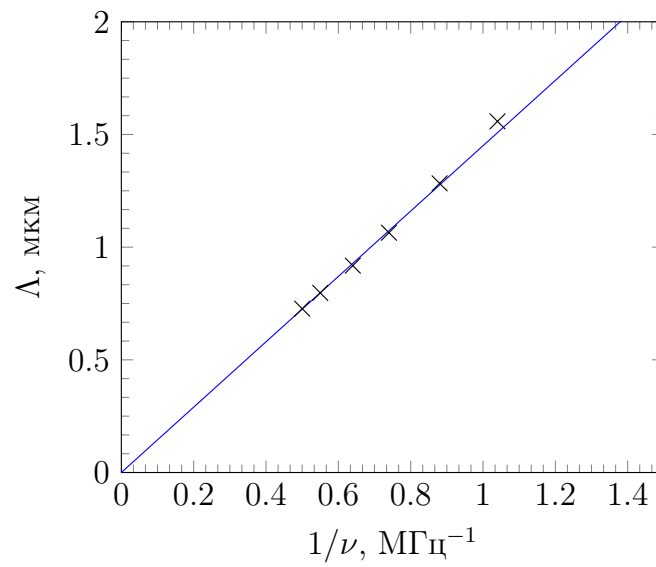


Рис. 4: График зависимости длины ультразвуковой волны  $\Lambda$  от частоты  $\nu$