

Лабораторная работа № 4.3.2  
Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Илья Прамский

Апрель 2024

# Введение

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

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

## 1 Теоретическая справка

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:

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

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

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

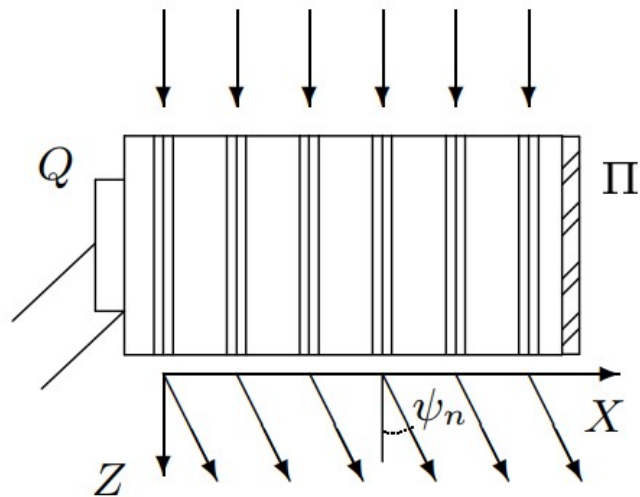


Рис. 1 — Эффект дифракции на ультразвуковой волне

## 2 Экспериментальная установка

Источник света  $L$  с помощью конденсора  $K$  проецируется на входную (коллиматорную) щель  $S$ . Входная щель ориентирована горизонтально и прикрыта красным светофильтром  $\Phi$ . Коллиматорный объектив  $O_1$  посылает параллельный пучок на кювету с водой. Излучатель  $Q$  создаёт УЗ-волну. Параллельный пучок света, диффразируя на стоячей звуковой волне, образует дифракционную картину в фокальной плоскости  $F$  камерного объектива  $O_2$ . Картину можно наблюдать в микроскоп  $M$ .

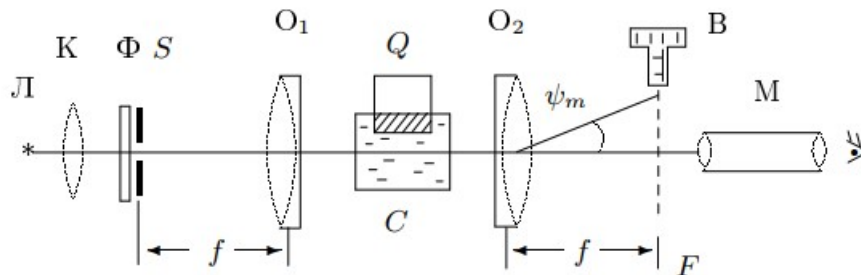


Рис. 2 — Схема экспериментальной установки

### 3 Ход работы

#### Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

Для начала соберём и настроим схему, затем определим ноль для ширины щели(момент её открытия). Получился  $d = 77 \pm 1$  мкм. Установим рабочую ширину в диапазоне  $20 - 30$  мкм. Установили на  $d = 100 \pm 1$  мкм, соответственно рабочая ширина щели равна  $23 \pm 1$  мкм.

Чёткая дифракционную картина в поле зрения микроскопа получается при  $\nu = 984,6 \pm 0,1$  кГц., оценим по порядку величину длины УЗ-волны как удвоенное расстояние между наиболее чёткими дифракционными картинами. Две чёткие дифракционные картины получились на 19 и 99 соответственно(в ценах деления лимба излучателя, каждая из которых равна 10 мкм). Получается  $\Lambda = 2 \cdot (l_2 - l_1) = 1600 \pm 30$  мкм. Теперь оценим скорость звука в воде по формуле (5).

$$v = 1570 \pm 30 \text{ м/с}$$

Теперь определим координаты дифракционных полос для различных частот, затем по полученным данным построим графики зависимости  $Y = Y(m)$ , с помощью которых определим расстояние между соседними полосами, после чего при помощи формулы (4), рассчитаем длину УЗ-волны, а также с помощью формулы (5) найдём значение скорости звука в воде.  $f = 28$  см,  $\lambda = 6400 \pm 200 \text{ Å}$ .  $\sigma_Y = 4$  мкм.

	$\nu_1 = 984,4 \text{ кГц}$	$\nu_2 = 1002,0 \text{ кГц}$	$\nu_3 = 1006,0 \text{ кГц}$
$m$	$Y$ , мкм	$Y$ , мкм	$Y$ , мкм
-3	4600	4652	4644
-2	4500	4516	4524
-1	4388	4392	4400
0	4248	4264	4264
1	4120	4128	4124
2	4004	4008	3988
3	3868	3884	3864

	$\nu_4 = 1025,0 \text{ кГц}$	$\nu_5 = 1600,0 \text{ кГц}$	$\nu_6 = 4420,0 \text{ кГц}$
$m$	$Y$ , мкм	$Y$ , мкм	$Y$ , мкм
-3			
-2	4560		
-1	4440	4460	4820
0	4268	4256	4260
1	4092	4056	3700
2	3948		
3			

График зависимости  $Y$  от  $m$  для  $v1$   
(полоски погрешностей крайне малы, из-за чего их не видно)

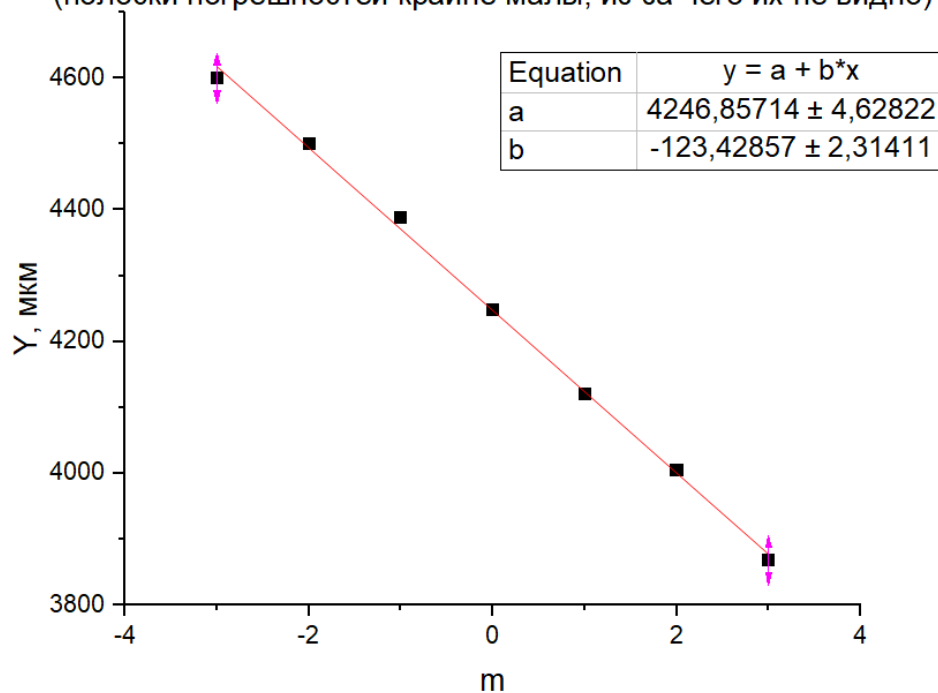


График зависимости  $Y$  от  $m$  для  $v2$   
(полоски погрешностей крайне малы, из-за чего их не видно)

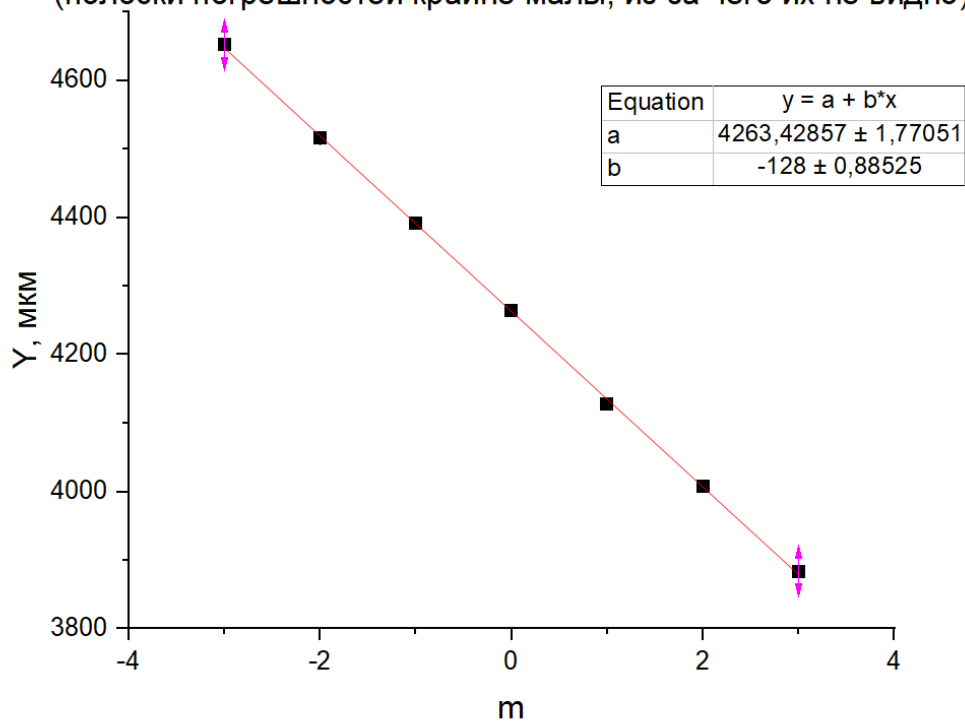


График зависимости  $Y$  от  $m$  для  $v_3$   
(полоски погрешностей крайне малы, из-за чего их не видно)

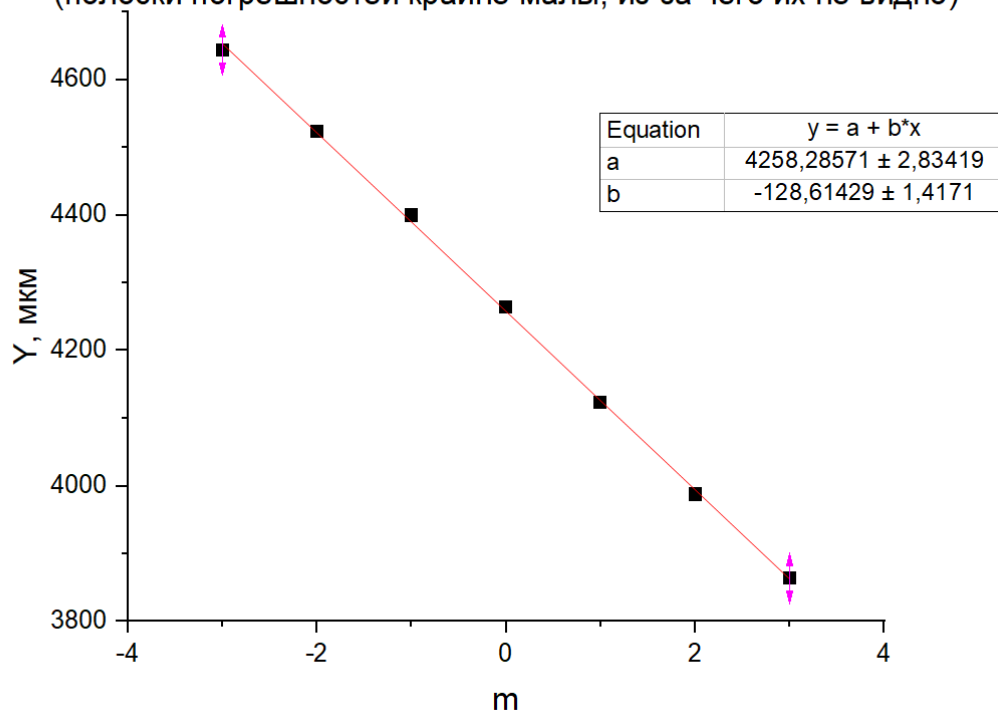
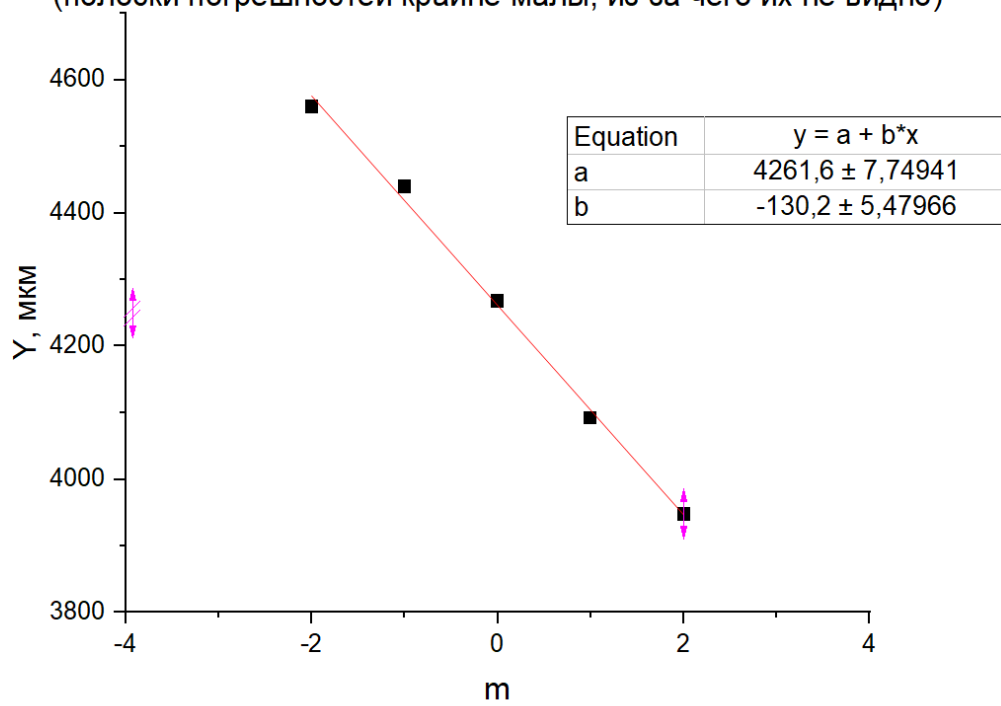
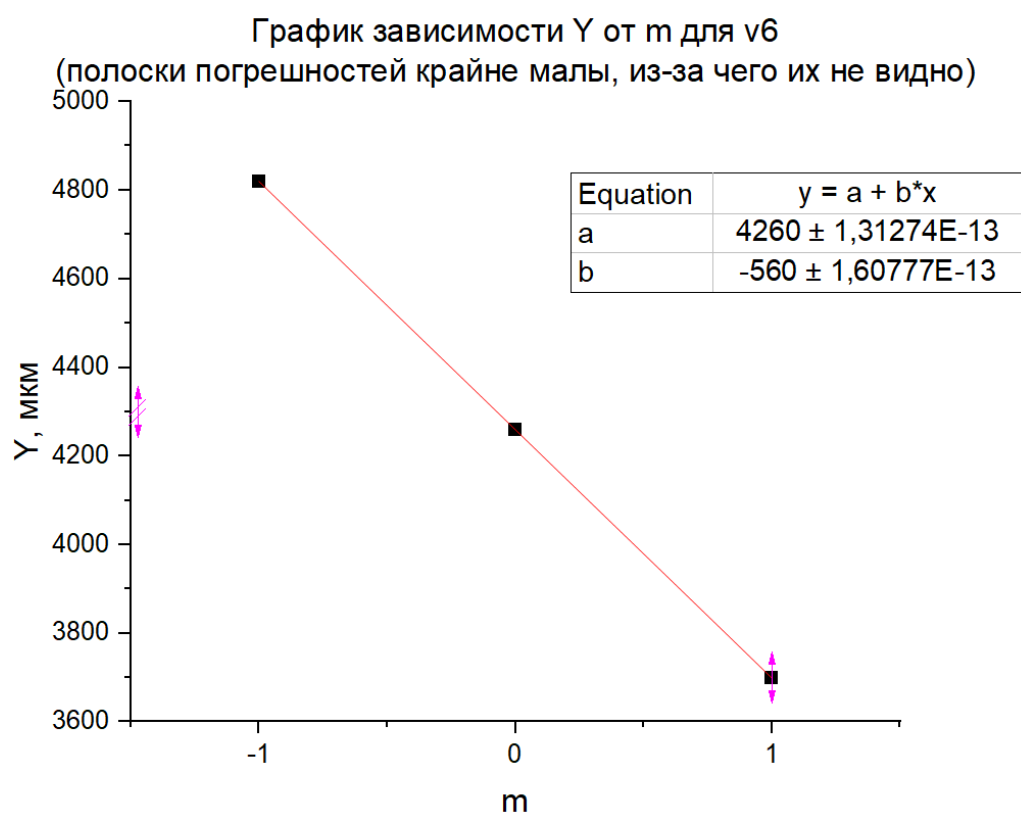
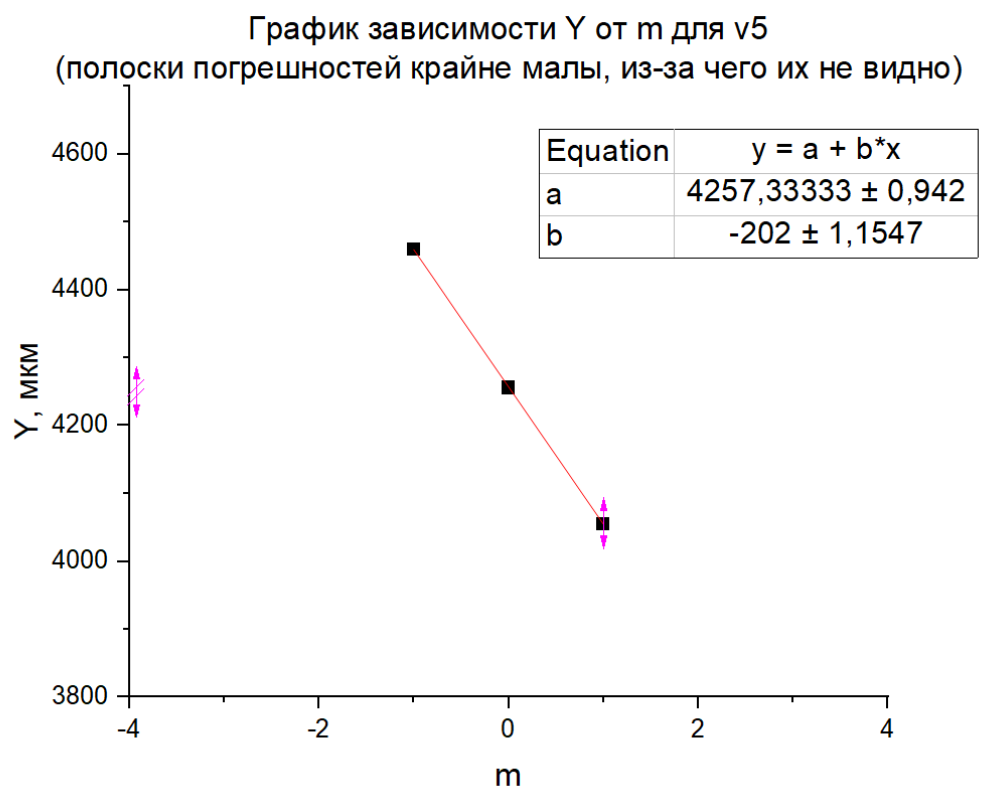


График зависимости  $Y$  от  $m$  для  $v_4$   
(полоски погрешностей крайне малы, из-за чего их не видно)





Полученные значения занесём в таблицу

$\nu$ , кГц	$\Delta l$ , мкм	$\sigma_{\Delta l}$ , мкм	$\Lambda$ , мкм	$\sigma_{\Lambda}$ , мкм	$V$ , м/с	$\sigma_V$ , м/с
984,4	123	2	1457	50	1434	51
1002,0	128,0	0,9	1400	40	1403	45
1006,0	128,6	1,4	1393	50	1402	46
1025,0	130	5	1378	70	1413	70
1060,0	202,0	1,2	887	30	1419	45
4420,0	560	0	320	10	1414	44

Получается средняя скорость звука в воде исходя из проведённых измерений равна  $V = 1414 \pm 21$  м/с. Теоретическое же значение равно 1403 м/с, что находится достаточно близко к полученному на опыте (даже лежит в пределах погрешности экспериментального значения).

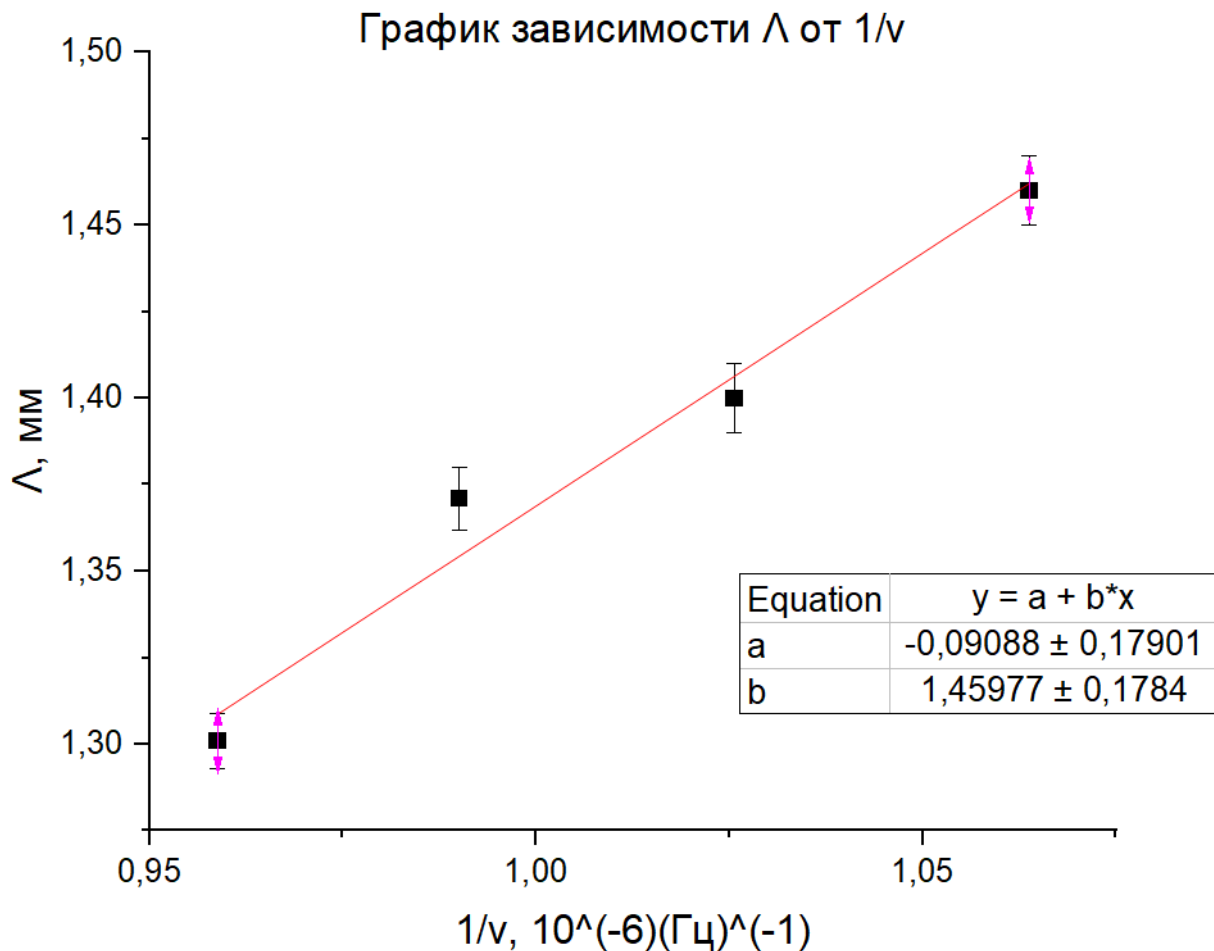
## Определение скорости ультразвука методом тёмного поля

Теперь поставим между щелью и микроскопом дополнительную линзу, затем также установим в воде пластинку с калибровочной сеткой, сторона квадрата у которой равна 1 мм. При помощи этой сетки откалибруем окулярную шкалу микроскопа. Так, на 1 квадрат, приходится 23 штриха окулярной шкалы микроскопа, значит цена деления равна  $\frac{1}{23}$  мм.

Также закроем нулевой дифракционный максимум провололочкой. Теперь, меняя частоту, найдём наиболее чёткие картины звуковой решётки, затем измерим координаты первой и последней тёмных полос и количество светлых промежутков между ними. Результаты измерений занесём в таблицу, с их помощью найдём длину УЗ-волны  $\Lambda$ , учитывая удвоение числа наблюдаемых полос. Построим график зависимости  $\Lambda = f(\frac{1}{\nu})$ , при помощи которого (по наклону) определим скорость звука в воде. ( $x_1, x_n$  координаты первой и последней полосы соответственно). Также в таблице единица "дел" отвечает за 25 штрихов окулярной шкалы.

$\nu$ , кГц	$x_1$ , дел	$x_n$ , дел	$\Delta x$ , мм	$m$	$\Lambda$ , мм	$\sigma_{\Lambda}$ , мм
940	-1	7,73	9,49	13	1,46	0,01
975	-1	7,37	9,10	13	1,40	0,01
1010	-1	7,83	9,60	14	1,37	0,01
1043	-1	7,98	9,76	15	1,30	0,008





Получается из графика  $V = 1459 \pm 178$  м/с, что также охватывает в свой диапазон теоретическое значение.

## 4 Вывод

В ходе данной работы была изучена дифракция на акустической решётке, с её помощью различными способами была как и оценена скорость звука в воде ( $v = 1570 \pm 30$  м/с), так и вычислена более точно при помощи формул (4) и (5) и исследования зависимости координат дифракционных полос от порядка максимума при различных частотах, в результате чего было получено значение  $v = 1414 \pm 21$  м/с. Также во время выполнения удалось получить чёткие картины звуковой решётки, с помощью которых также была вычислена скорость звука в воде (получившееся значение равно  $v = 1459 \pm 178$  м/с). Теоретическое же значение равно 1403 м/с, что согласуется с полученными нами данными. Самым дальним от табличного получилось первое значение, что можно объяснить недостаточной точностью этого способа вычисления (в задании просили оценить этим способом значение скорости звука в воде).