

Московский физико-технический институт

Вопрос по выбору (практическая часть)

(Общая физика: оптика)

# Дифракция света на ультразвуковой волне

Работу выполнил:

Лазарь Владислав, группа Б01-202

г. Долгопрудный

2024 год

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

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

## Теоретическое введение

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:

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

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:

$$\varphi = knL = \varphi_0(1 + m \cos \Omega x) \quad (2)$$

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.

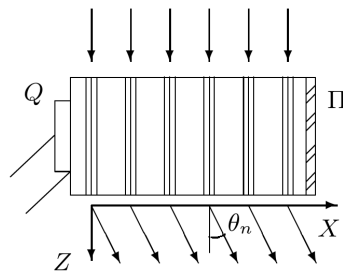


Рис. 1: Дифракция световых волн на акустической решетке

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:

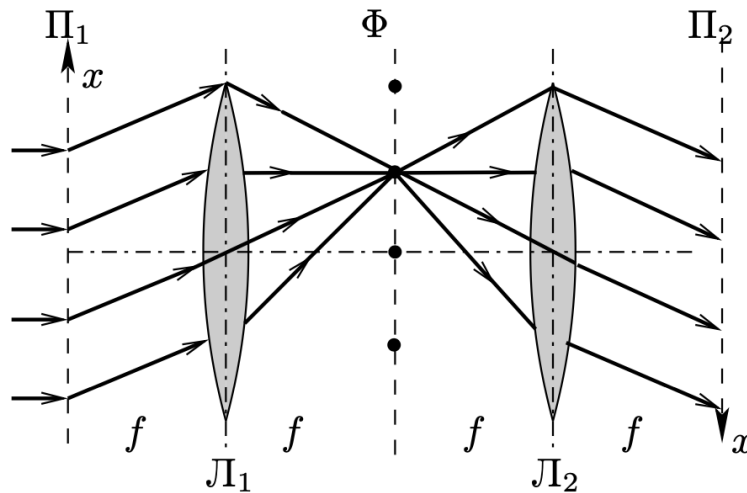
$$\Lambda = m\lambda F/l_m \quad (4)$$

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

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

## Метод фазового контраста и тёмного поля.

Рассмотрим проблему визуализации фазовых объектов, которую можно решить, используя метод фазового контраста, предложенный Цернике. Пусть фазовый объект — тонкая прозрачная пластинка, имеющая разный в разных точках показатель преломления (или толщину), но не изменяющая амплитуду прошедшей волны, находится во входной плоскости  $\Pi_1$  оптической системы.



Если оптическая система идеальна, в плоскости  $\Pi_2$  мы наблюдаем равномерную засветку: информация о фазовой структуре предмета потеряна, фазовый объект невидим.

Для визуализации фазового объекта Цернике предложил установить в фурье-плоскости, на оптической оси, маленькую фильтрующую пластинку, которая, не изменяя амплитуды прошедшей волны, вносит фазовую задержку, равную  $\pi/2$ .

В методе тёмного поля вместо фазовой пластинки в фурье-плоскости на оптической оси устанавливается непрозрачный маленький экран.

# 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.

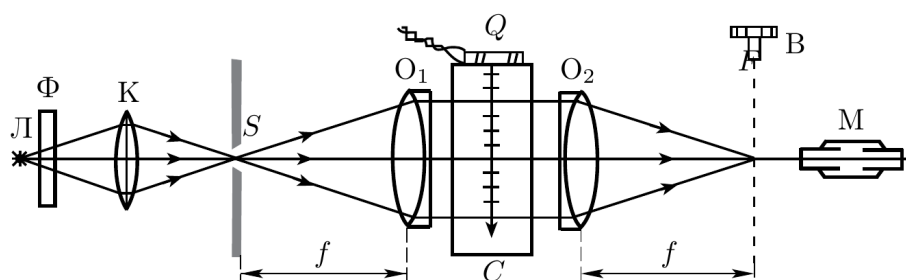


Рис. 2: Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

## 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.

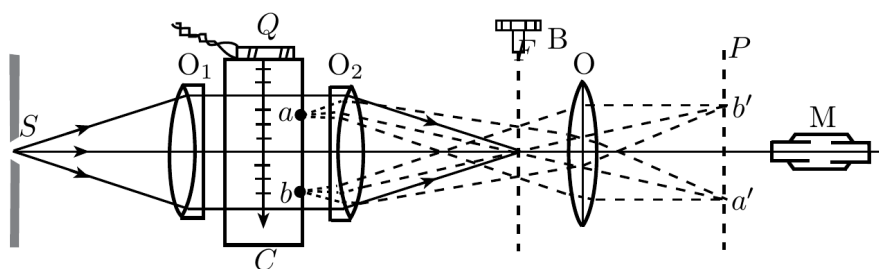


Рис. 3: Схема для наблюдения дифракции методом темного поля

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 6 делениях миллиметровой шкалы убирается 100 маленьких делений окулярной. Значит, цена деления окулярной шкалы:  $C = 0,06$  мм.

# Ход работы

Данные с установки:

$$\lambda_{\text{кр}} = 6400 \pm 200 \text{ \AA}, \quad f_1 = 94 \text{ см}, \quad f_2 = 28 \text{ см}, \quad f = 110 \text{ см}.$$

## Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

- цена деления лимба равна 10 мкм
- один оборот лимба равен 50 делениям
- максимальное перемещение излучателя — 2 мм

## Оценка по порядку величины скорости ультразвука в дифракционной решётке

После построения и настройки установки, изображённой на рис. 3, найдём рабочую частоту — частоту, при которой видно наибольшее количество дифракционных полос:  $\nu = 1.046 \text{ МГц}$  (при этой частоте видно 7 полос). А также оценим по порядку величины скорость звука как удвоенное расстояние между наиболее чёткими дифракционными картинками:  $n = 160$  делений. Тогда длина волны будет равна:

$$\Lambda = 10n = 1600 \text{ мкм} = 1.6 \text{ мм},$$

Соответственно для погрешности  $\Lambda$ :

$$\sigma_{\Lambda} = \Lambda \frac{\sigma_n}{n} = 0.01 \text{ мм},$$

Теперь можем оценить скорость ультразвуковой волны, зная длину волны:

$$v = \Lambda \nu = 1673.6 \text{ м/с},$$

И выражение для погрешности  $\sigma_v$ :

$$\sigma_v = v \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Lambda}}{\Lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\nu}}{\nu}\right)^2} = 10.6 \text{ м/с},$$

Итого:

$$v = (1673.6 \pm 10.6) \text{ м/с}.$$

## Точный метод нахождения скорости ультразвука в дифракционной решётке

Измерим положение дифракционных полос  $x_m$  в зависимости от номера полосы. Повторим измерения для нескольких частот, на которых четко видна дифракционная картина. Результаты занесем в таблицу:

$\nu = 1.08 \text{ МГц}$		$\nu = 1.94 \text{ МГц}$		$\nu = 3.2 \text{ МГц}$	
$m$	$x_m, \text{ мкм}$	$m$	$x_m, \text{ мкм}$	$m$	$x_m, \text{ мкм}$
-3	-140	-2	150	-1	260
-2	-30	-1	405	0	630
-1	90	0	635	1	1000
0	228	1	850	—	—
1	370	2	1090	—	—
2	490	—	—	—	—
3	605	—	—	—	—

Таблица 1: Результаты измерений координат дифракционных полос

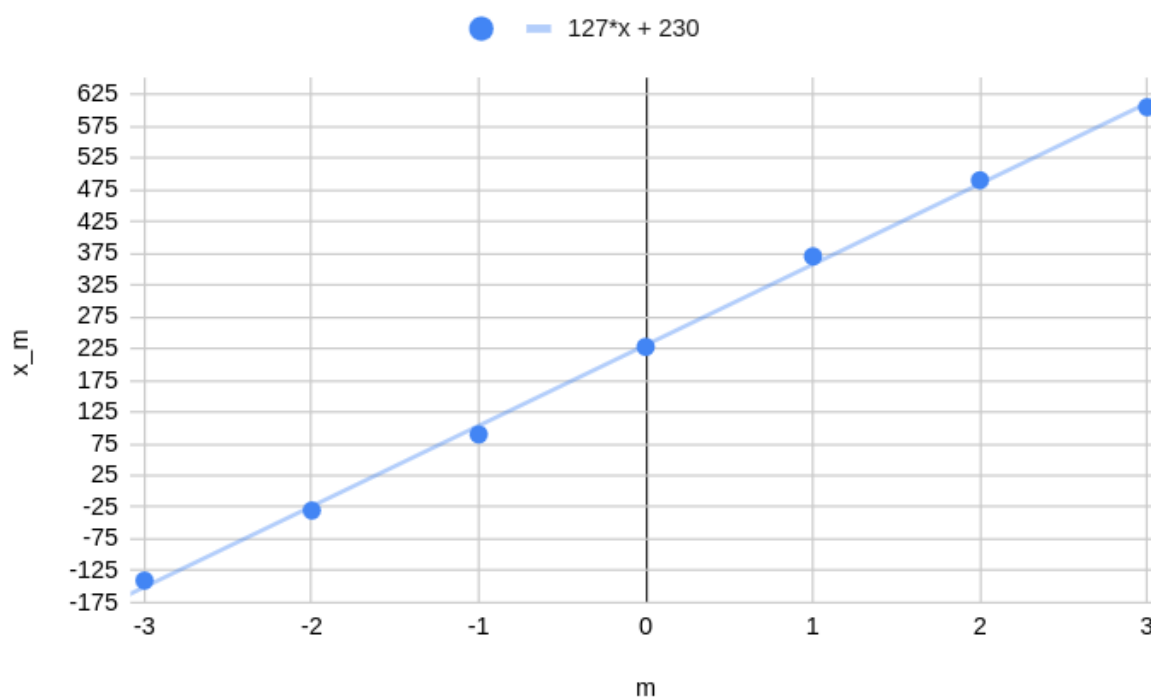
По результатам измерений построим графики. Здесь  $\Delta x_m = l_m$  — расстояние от нулевого максимума до  $m$ -того максимума.

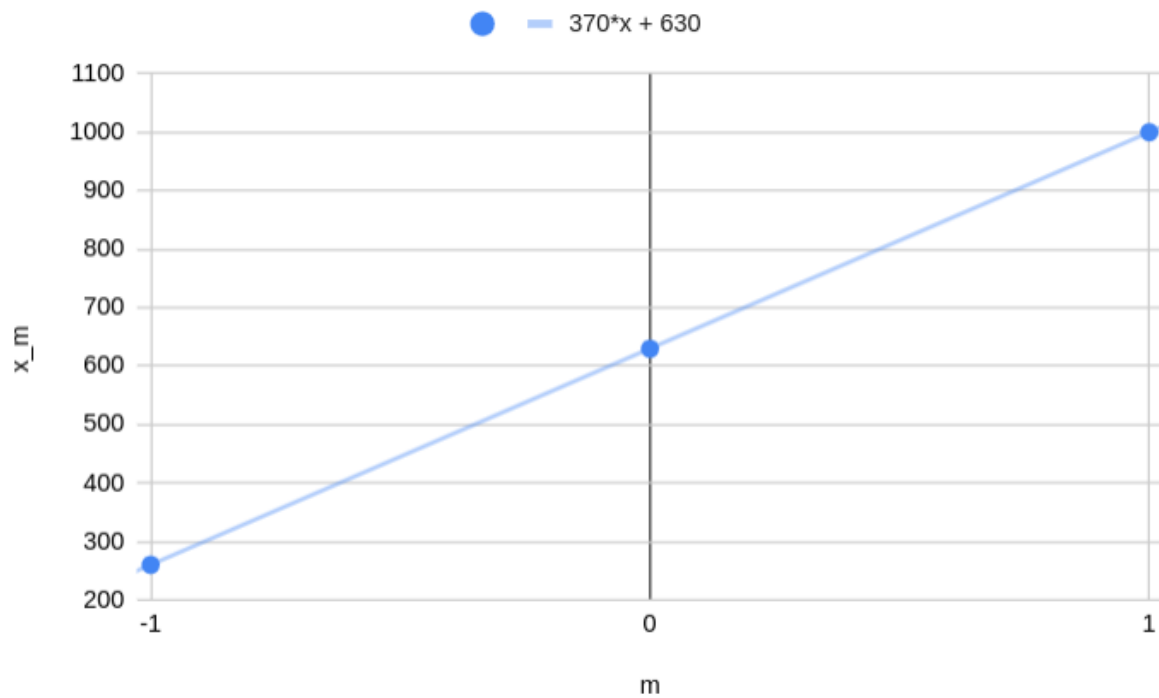
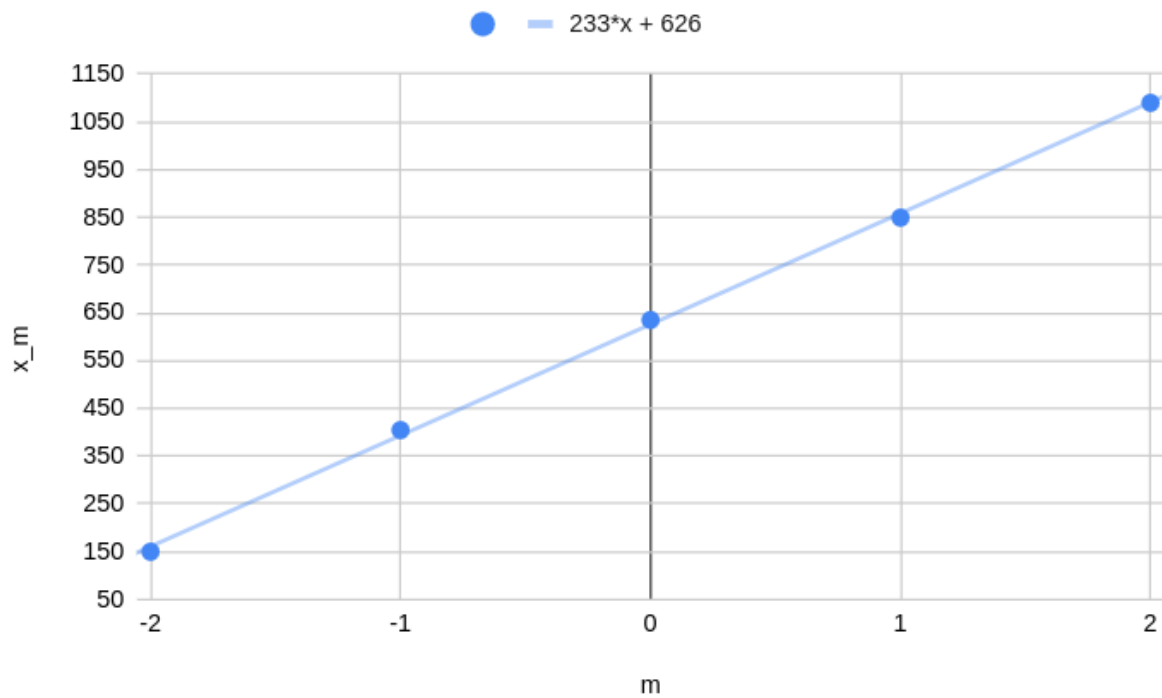
Находим  $v$ :

$$v = \nu m f \frac{\lambda}{l_m} = \nu f \frac{\lambda}{k}$$

В таблицу 2 занесём полученные коэффициенты наклона из графиков и скорость, посчитанную по формуле выше, учитывая, что погрешности равны:

$$\sigma_v = v \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\nu}{\nu}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2}$$





$\nu$ , МГц	1.08	1.94	3.2
$k$	$127 \pm 2$	$233 \pm 4$	$370 \pm 0$
$v$ , м/с	$1524 \pm 55$	$1492 \pm 58$	$1550 \pm 62$

Таблица 2: Найденная по коэффициентам наклона скорость звука в воде

Рассчитаем среднее значение скорости ультразвука и погрешность. Погрешность будем считать следующим образом (причём,  $v = v(v_1, v_2, v_3) = \frac{v_1 + v_2 + v_3}{3}$ ):

$$\sigma_v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial v_1}\right)^2 \sigma_{v_1}^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial v_2}\right)^2 \sigma_{v_2}^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial v_3}\right)^2 \sigma_{v_3}^2}$$

$$v = 1520 \pm 30 \text{ м/с}$$

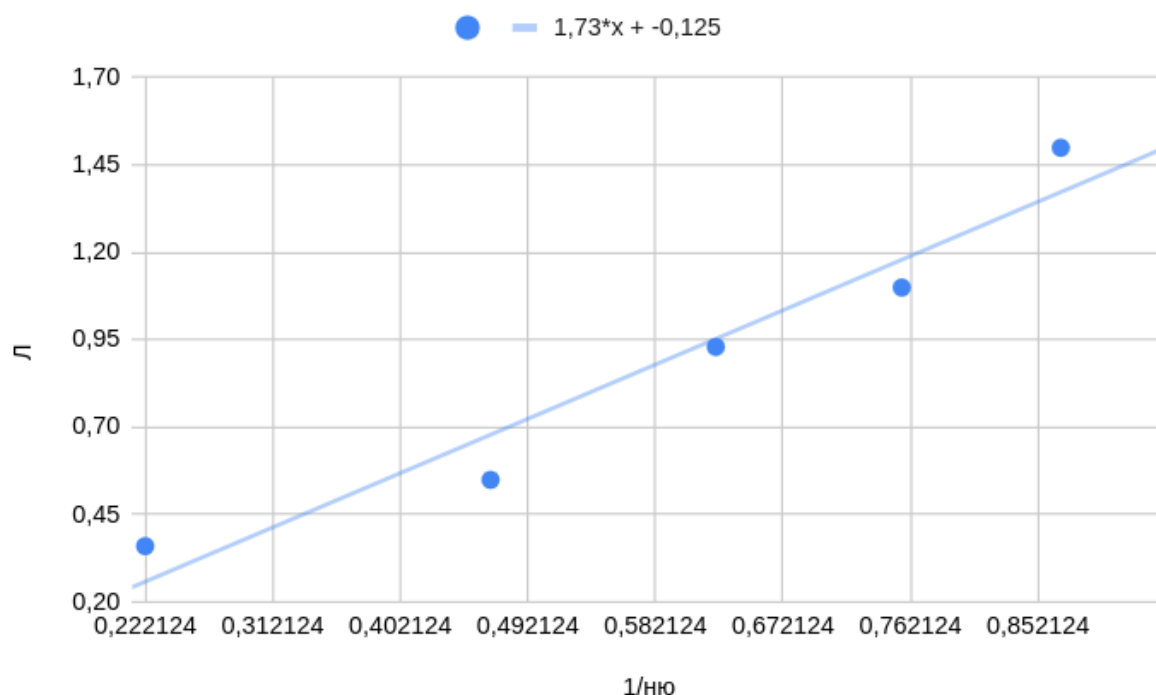
## Определение скорости ультразвука методом тёмного поля

Для измерений методом темного поля добавим к системе еще одну линзу, расположив ее между микроскопом и линзой  $O_2$ . Измерим для различных частот расстояние координаты крайних хорошо видимых темных полос и число светлых промежутков между ними. Также рассчитаем, используя измерения, длину волны по формуле  $\Lambda = \frac{2(x_1 - x_0)}{m}$ . Получившиеся результаты занесём в таблицу:

$\nu$ , МГц	$x_0$ , мм	$x_1$ , мм	$m$	$\Lambda$ , мм
1.152	5.0	6.5	2	1.50
1.323	4.9	6.0	2	1.10
1.601	4.5	5.9	3	0.93
2.147	4.8	5.9	4	0.55
4.502	4.7	5.6	5	0.36

Строим график зависимости  $\Lambda(\frac{1}{\nu})$ . По нему определим скорость ультразвука:

$$v = 1730 \pm 250 \text{ м/с}$$





## Качественные наблюдения

При закрытии проволокой максимума с номером, отличным от 0, наблюдаем, что период картины не меняется, а менется лишь четкость картины. Это связано с тем, что на период влияет лишь расстояние между ближайшими максимумами, которые формируют эту картину, а при закрытии одного любого из них, расстояние между ближайшими не меняется.

## Заключение

- Определили скорость ультразвука по дифракционной картине. Полученные результаты совпали с табличными в пределах погрешности.
- Определили скорость ультразвука методом тёмного поля. Полученные результаты совпали с табличными в пределах погрешности.
- Произвели качественные наблюдения и объяснили полученный результат.

