

Лабораторная работа 4.3.2

Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Татаурова Юлия, Павлов Матвей

11 апреля 2025 г.

Аннотация

В работе мы

Теоретические сведения

При прохождении ультразвуковой (УЗ) волны через жидкость в ней возникают периодические оптические неоднородности, обусловленные разницей значений коэффициента преломления в областях сжатия и разрежения. Эти периодические неоднородности играют роль своеобразной дифракционной решётки для проходящего сквозь жидкость света.

Пусть УЗ-волна распространяется вдоль оси X в жидкости, налитой в стеклянную кювету. В направлении оси Z сквозь жидкость проходит световая волна, испытывающая дифракцию на акустической решётке. Поскольку скорость света значительно больше скорости звука, акустическую решётку можно считать неподвижной. Вызванное ультразвуком возмущение показателя преломления жидкости в нашем случае очень мало. При этом естественно сделать предположение, что акустическую решётку можно рассматривать как тонкий фазовый экран.

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

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

Пусть фаза световых колебаний на передней поверхности жидкости равна нулю. Тогда на задней поверхности она равна

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

где L — толщина слоя жидкости в кювете, $\varphi_0 = kn_0L$. Таким образом, в плоскости $z = 0$ фаза световых колебаний является периодической функцией координаты x , иными словами — УЗ-волна в жидкости создаёт фазовую дифракционную решётку.

Можно 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:

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

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

При малой глубине фазовой модуляции поле, после прохождения через кювету, будет представлять собой совокупность трёх волн:

$$f_0(x) = e^{im \cos \Omega x} \approx 1 + im \cos \Omega x = 1 + \frac{im}{2} e^{i\Omega x} + \frac{im}{2} e^{-i\Omega x} \quad (2)$$

В методе тёмного поля вместо фазовой пластинки в $\pi/4$ фурье-плоскости на оптической оси устанавливается непрозрачный экран. Осевая плоская волна, фокусируясь линзой в начале координат фурье-плоскости, поглощается непрозрачным экраном и не участвует в формировании изображения. Боковые же волны остаются без изменения. Поле в выходной плоскости в этом случае имеет вид:

$$f(x) = \frac{im}{2} e^{i\Omega x} + \frac{im}{2} e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x,$$

а картина интенсивности:

$$I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x.$$

Однако, в общем случае (когда глубина модуляции не является малой величиной) после прохождения через кювету световое поле представляет совокупность не трёх, а большого числа плоских волн, распространяющихся под углами, определяемыми условием

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (3)$$

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

Определяя на опыте положение дифракционных максимумов различного порядка, можно найти длину Λ УЗ-волны и вычислить скорость v распространения ультразвуковых волн в жидкости, если известна частота ν колебаний кварцевого излучателя:

$$v = \Lambda \nu.$$

Длина Λ ультразвуковой волны определяется с помощью 3; в силу малости углов θ_m окончательное выражение может быть представлено в виде:

$$l_m = mf \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (4)$$

где l_m — измеренное на опыте линейное расстояние между m -м и нулевым максимумами, а f — фокусное расстояние объектива O_2 .

Экспериментальная установка

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

Параметры Экспериментальной установки:

Цена деления микрометрического винта: 4 мкм

Длина волны красного светофильтра: $\lambda_{кр} = 640 \pm 20$ нм

Длина волны зеленого светофильтра: $\lambda_{зел} = 546 \pm 50$ нм

Фокусное расстояние линзы: $F = 30$ см

I. Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

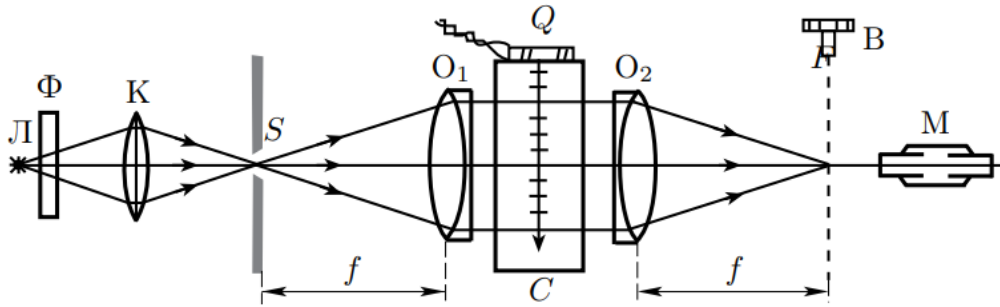


Рис. 1: Экспериментальная установка для наблюдения дифракции на акустической решётке

Источник света Л через светофильтр Ф и конденсор К освещает щель S, которая расположена в фокусе объектива O_1 . Выходящий из объектива параллельный пучок света проходит через кювету C перпендикулярно направлению распространения УЗ-волн. Эти волны возбуждаются в жидкости пьезокварцевой пластинкой Q, прикреплённой к стенке кюветы. На кварцевую пластинку подаётся напряжение ультразвуковой частоты от генератора. В фокальной плоскости второго объектива O_2 образуется дифракционная картина, наблюдаемая при помощи микроскопа М.

Длина Λ ультразвуковой волны определяется с помощью 3; в силу малости углов θ_m окончательное выражение может быть представлено в виде

$$l_m = mf \frac{\lambda}{\Lambda},$$

Передвижением линзы была найдена чёткая дифракционная картина.

Затем, перемещая излучатель с помощью микрометрического винта, мы нашли расстояние между четкими дифракционными картинами и оценили по порядку величины длину УЗ-волны как удвоенное расстояние между наиболее чёткими дифракционными картинами: $\Lambda = 2 \cdot 0.73 = 1.46$ мм $\Rightarrow v_{зв} = \Lambda \nu = 1664$ м/с

Измерили положения x_m пяти дифракционных максимумов для трех частот:

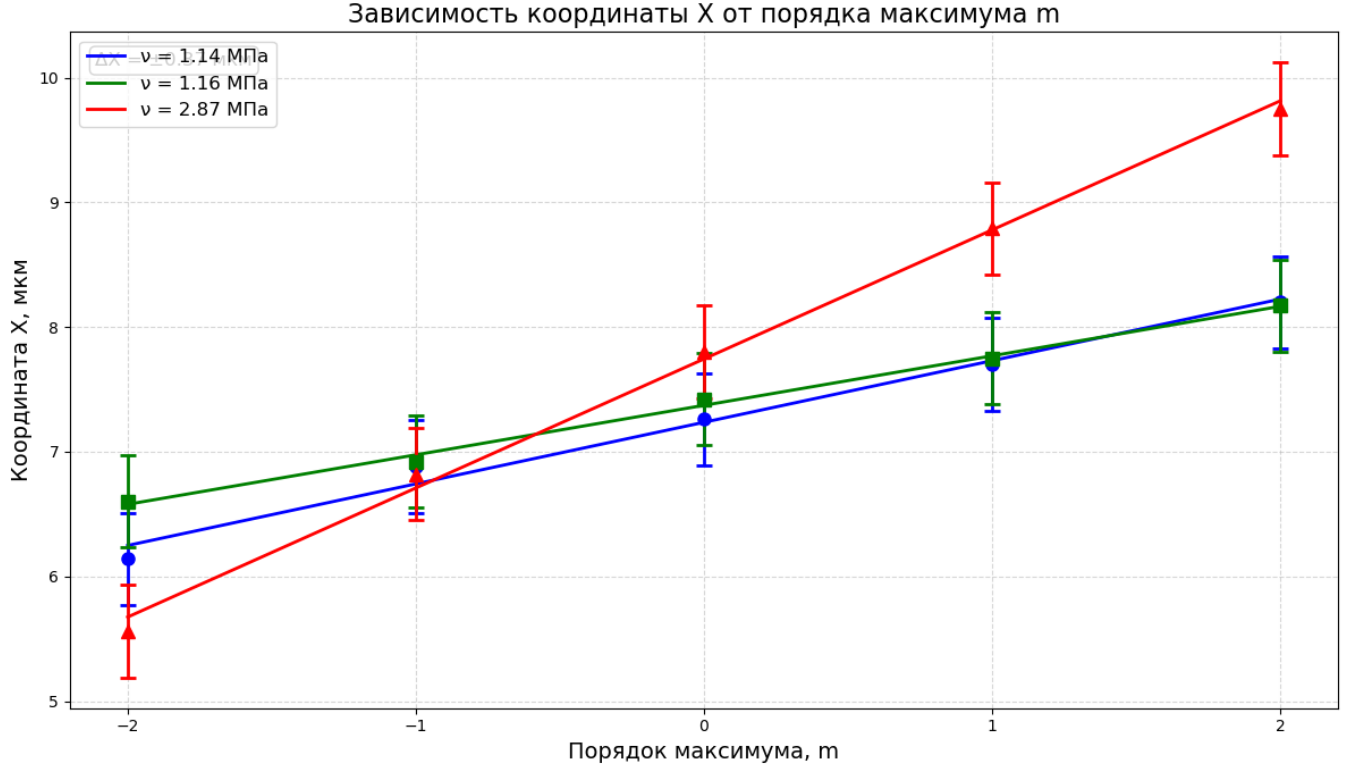
Расстояние между соседними полосами вычислим по формуле:

$$l = \frac{\Delta x_m}{\Delta m} \quad (5)$$

По формуле 4 вычислим длину волны УЗ-волны.

m/ν , МГц	1.14	1.16	2.87
-2	6.14	6.6	5.56
-1	6.88	6.92	6.82
0	7.26	7.42	7.8
+1	7.7	7.75	8.79
+2	8.2	8.17	9.75

Таблица 1: Зависимость расположения (x_m мкм) дифракционных максимумов разных порядков от частоты



ν , МГц	1.14	1.16	2.87
l , нм	494 ± 27	397 ± 24	1035 ± 31
Λ , мм	3.7 ± 0.2	4.8 ± 0.3	1.8 ± 0.1
v , м/с	4200 ± 200	5560 ± 350	5200 ± 300

Таблица 2: Расстояние между соседними полосами и длина ультразвуковой волны для различных частот

II. Определение скорости ультразвука методом тёмного поля

Получили видимое изображение фазовой акустической решётки. Для этого, прежде всего, получили в поле зрения микроскопа изображение задней плоскости кюветы. Это достигается с помощью вспомогательной положительной линзы O , которую располагают на оптической скамье за фокальной плоскостью объектива O_2 .

Для наблюдения пространственной структуры фазовой решётки можно использовать метод *тёмного поля*, основанный на устранении центрального дифракционного максимума с

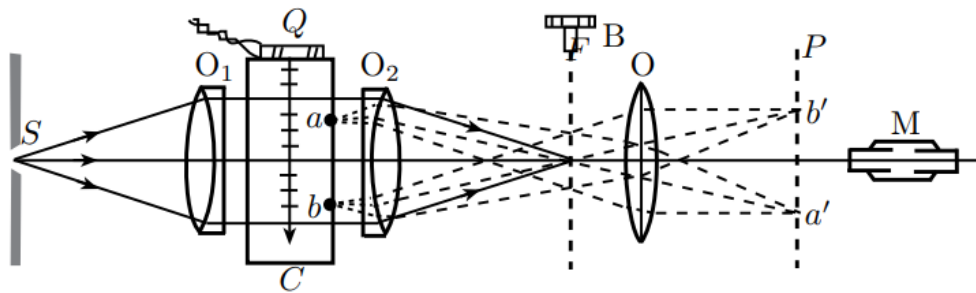


Рис. 2: Экспериментальная установка для наблюдения акустической решётки методом темного поля

помощью специального экрана.

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.

К задней стенке кюветы прижмали стеклянную пластинку с миллиметровыми делениями. Передвигая микроскоп, сфокусировали его на изображение пластинки. Определили цену деления окулярной шкалы в условиях опыта: **цена деления шкалы в микроскопе 0.1 мм.**

Закрыли центральный дифракционный максимум вертикальной нитью. Измерили длину УЗ-волны в воде. Для этого с помощью окулярной шкалы измерили расстояние между самыми дальними из хорошо видимых в поле зрения тёмных посчитали число промежутков между ними.

При частоте $\nu = 1.14$ МГц число темных полос равно $n = 10$. При этом расстояние между полосами $\delta = 0.94$ мм. Тогда расстояние между полосами будет $l = \frac{\delta}{n} = 0.94$ мм. Длина ультразвуковой волны $\Lambda = \frac{f\lambda}{l} = 2 \pm 0.4$ мм. Тогда скорость звука в воде $v = 2280 \pm 450$ м/с.

Вывод

Мы получили длину УЗ-волны различными способами. Сначала по расстоянию между полосами дифракционной картины на акустической решетке. Результаты менялись в зависимости от частоты. Табличное значение для длины УЗ-волны в воде порядка 1.5 мм. Мы получили разброс значений от 1.5 мм до почти 5 мм в зависимости от частоты генератора. Это можно объяснить тем, что в кювете могла быть и не вода вовсе или вода с примесями, поэтому значения могут варьироваться. Еще одной причиной может быть неточное определение координат полос и расстояний между ними, потому что мы могли ошибиться на полуширину этой полосы.