

Лабораторная работа 4.3.2 (Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости — установка с горизонтальной щелью)

Астафуров Евгений Б05-812

Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет).

(Дата: 8 апреля 2020 г.)

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

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

I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В работе изучается дифракция света на фазовой решетке. Фазовая решетка создается в жидкости ультразвуковыми волнами и наблюдается методом темного поля.

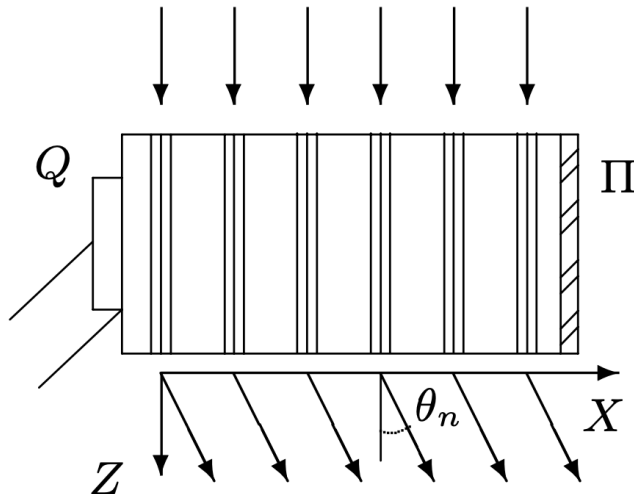


Рис. 1. Дифракция световых волн на акустической решетке

При прохождении ультразвуковой (УЗ) волны через жидкость в ней возникают периодические оптические неоднородности, обусловленные разницей значений коэффициента преломления в областях сжатия и разрежения. Эти оптические неоднородности играют роль своеобразной дифракционной решетки 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 решетке. Поскольку скорость света значительно больше скорости звука, акустическую решетку можно считать неподвижной. Вызванное ультразвуком возмущение показателя преломления в жидкости в нашем случае очень мало. При этом есте-

ственно сделать предположение (справедливость которого мы потом исследуем теоретически и экспериментально), что акустическую решетку можно рассматривать как тонкий фазовый экран.

При небольших амплитудах показатель преломления жидкости меняется по закону

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

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

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

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

где L — толщина слоя жидкости в кювете, k — волновое число для света ($k = 2\pi/\lambda$), λ — длина световой волны, $\varphi_0 = kn_0L$. Таким образом, в плоскости $z = 0$ фаза световых колебаний является периодической функцией координаты x , иными словами — УЗ-волна в жидкости создает световую дифракционную решетку.

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

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

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

В общем случае, после прохождения через кювету световое поле представляет совокупность не трех, а большего числа плоских волн, распространяющихся под углами, определяемыми 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.

Определяя на опыте положение дифракционных максимумов различного порядка, можно по формуле (4) найти длину Λ УЗ-волны и вычислить скорость v распространения ультразвуковых волн в жидкости, если известна частота ν колебаний кварцевого излучателя:

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

Рассматриваемая теория применима как для бегущих, так и для стоячих ультразвуковых волн. Стоячие УЗ-волны образуются при наложении волны, идущей от излучателя и волны, отраженной от задней стенки кюветы. Если же заднюю стенку кюветы покрыть слоем пористой резины (слой П на рис. 1), то волна от нее не отражается, и в кювете образуется практически чистая бегущая волна. Следует иметь в виду, что в стоячей волне амплитуда изменения давления (а следовательно и коэффициента преломления) больше, чем в бегущей волне, создаваемой тем же излучателем. В связи с этим дифракционная картина в первом случае содержит большее число максимумов.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для наблюдения дифракции света на УЗ-волнах на оптической скамье собирается установка, изображенная на рис. 2.

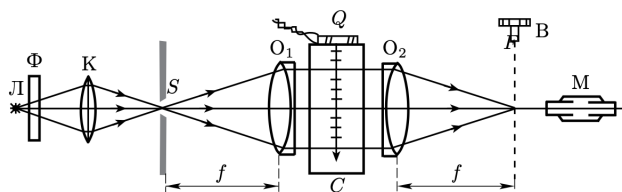


Рис. 2. Схема наблюдения дифракции на акустической решетке

Источник света Л через светофильтр Ф и конденсатор К освещает щель S, которая расположена в фокусе объектива O_1 . Выходящий из объектива параллельный пучок света проходит через кювету С перпендикулярно направлению распространения УЗ-волн. Эти волны возбуждаются в жидкости пьезокварцевой пластинкой Q, прикрепленной к стенке кюветы. На кварцевую пластинку подается напряжение ультразвуковой частоты от генератора (на

рис. 2 не показан). В Фокальной плоскости второго объектива O_2 образуется дифракционная картина, наблюдаемая при помощи микроскопа М. При этом обязательно применяют монохроматическое излучение (красный светофильтр).

Четкость дифракционных полос зависит от ряда факторов, например, от ширины щели S, от ее наклона по отношению к вертикали, от угла наклона кюветы к падающему лучу и т.д.

Длина Λ ультразвуковой волны определяется с помощью (4); в силу малости углов θ_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 и нулевым максимумами, а f — фокусное расстояние объектива O_2 .

III. НАБЛЮДЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ В ЖИДКОСТИ, МЕТОДОМ ТЕМНОГО ПОЛЯ

Попробуем теперь получить изображение фазовой акустической решетки. Для этого, но прежде всего, необходимо полкчить в поле зрения микроскопа изображение задней плоскости (считая по ходу световых лучей) кюветы. Это достигается с помощью вспомогательной положительной линзы O, которую располагают на оптической скамье за фокальной плоскостью объектива O_2 (рис. 3).

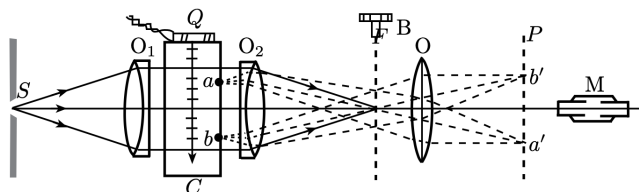


Рис. 3. Наблюдение акустической решетки методом темного поля

Перемещая микроскоп вдоль оптической скамьи, фиксируют его на плоскость P, где расположено четкое изображение $a'b'$ какого либо предмета ab , вплотную прижатого к стенке кюветы. Можно ли теперь увидеть в микроскоп УЗ-волну? Ясно, что чисто фазовая акустическая решетка является невидимой (если конечно выполнено условие (3)).

Для наблюдения пространственной структуры фазовой решетки можно использовать методы *фазового контраста* или *темного поля*. Фазовую структуру можно сделать невидимой при изменении фазы

колебаний в центральном дифракционном ма $\pm\pi/2$. Такой метод наблюдения носит название метода *фазового контраста*. В настоящей работе используется другой способ получения видимого изображения решетки — *метод темного поля*, основанный на устранении центрального дифракционного максимума с помощью специального экрана. Как нетрудно показать в поле зрения микроскопа будут наблюдаться чередующиеся светлые и темные полосы, причем расстояние между темными полосами соответствует смещению в плоскости кюветы на $\Lambda/2$. Таким образом, должно наблюдаться характерное для темного поля удвоение числа деталей рассматриваемой структуры. Этот опыт можно проводить только со стоячими волнами, т.к. в случае бегущей волны визуальное наблюдение оказывается невозможным: глаз не успева-ет следить за быстро перемещающейся волной.

IV. УСТАНОВКА С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ЩЕЛЬЮ

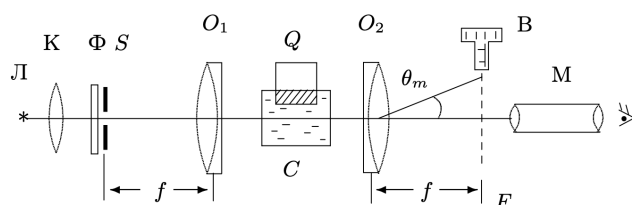


Рис. 4. Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

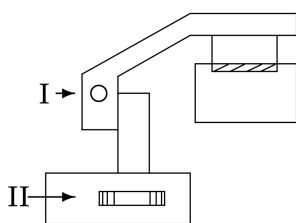


Рис. 5. Устройство для вертикального перемещения излучателя

Источник света Л (рис. 4) с помощью конденсатора К проецируется на входную (коллиматорную) щель S. Входная щель ориентирована горизонтально и прикрыта красным светофильтром Ф. Коллиматорный объектив O_1 посылает параллельный пучок на кювету с водой C.

Излучатель Q, погружённый в кювету, создаёт УЗ-волну. Вертикальное перемещение излучателя

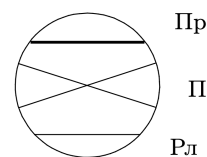


Рис. 6. Проволока Пр, перекрестие П и реперная линия Рл в фокальной плоскости объектива O_2

осуществляется винтом I (рис. 5), тонкая подача — лимбом II. При определённых положениях излучателя волна становится стоячей.

Параллельный пучок света, дифрагируя на стоячей звуковой волне, образует дифракционную картину в фокальной плоскости F (рис. 4) камерного объектива O_2 . Картину можно наблюдать в микроскоп M. Дифракционные полосы ориентированы горизонтально. Расстояние между ними можно измерить с помощью микрометрического винта В. Винт передвигает размещённые на стекле (рис. 6) в плоскости F перекрестие П, тонкую реперную линию Рл и толстую проволоку Пр, которая используется в методе тёмного поля.

V. ЗАДАНИЕ

В работе предлагается измерить координаты полос, образующихся при дифракции света на акустической решетке, а так же определить период этой решетки методом темного поля. По результатам измерений рассчитывается скорость ультразвука в воде. Все измерения ведутся на стоячей волне.

VI. ВЫПОЛНЕНИЕ

А. Определение скорости ультразвука по дифракционной картине

1.

Найдем четкую дифракционную картину и, перемещая излучатель с помощью микрометрического винта, оценим длину УЗ-волны как удвоенное расстояние между наиболее четкими дифракционными картинками:

$$\lambda = 1440 \text{ мкм}$$

2.

Измерим положения x_m дифракционных максимумов с помощью поперечного микрометрического винта. Один оборот винта (100 дел) соответствует перемещению в 1 мм.

$$f = 1.04 \text{ МГц}$$

m	1	2	3	4	5	6	7
$x_m, \text{ дел.}$	86	104	144	183	216	245	278
$x_m, 10^{-5} \text{ м}$	86	104	144	183	216	245	278

m		1	2	3
$f = 2.09 \text{ МГц}$	$x_m \cdot 10^{-5} \text{ м}$	40	183	320
$f = 4.5 \text{ МГц}$	$x_m \cdot 10^{-5} \text{ м}$	119	183	246

Полоса пропускания света на светофильтре:

$$\lambda_{\text{кр.}} = (6400 \pm 200) \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Фокусное расстояние объектива O_2 :

$$F = 28 \text{ см}$$

Построим графики зависимостей координат x_m от порядка m .

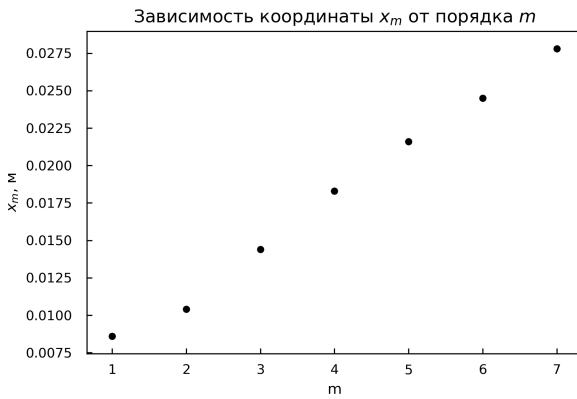


Рис. 7. $f_1 = 1.04 \text{ МГц}$

$$a_{f_1} = (33.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$$

$$b_{f_1} = (4.6 \pm 0.9) \cdot 10^{-4}$$

Пользуясь формулой

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

найдем Λ :

$$\Lambda = \frac{1}{a} F \lambda$$

$$\Lambda_{f_1} = (5.4 \pm 0.6) \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

3.

Теперь сделаем то же самое для других частот.

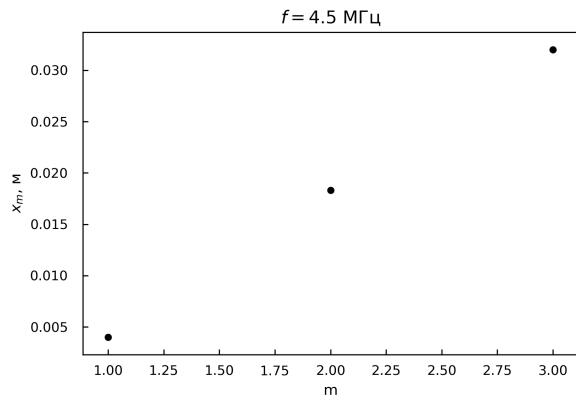


Рис. 8. Зависимость координаты от m

$$a = (14 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$$

$$\Lambda_{f_2} = (1.2 \pm 0.3) \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

И для частоты 2.09 МГц:

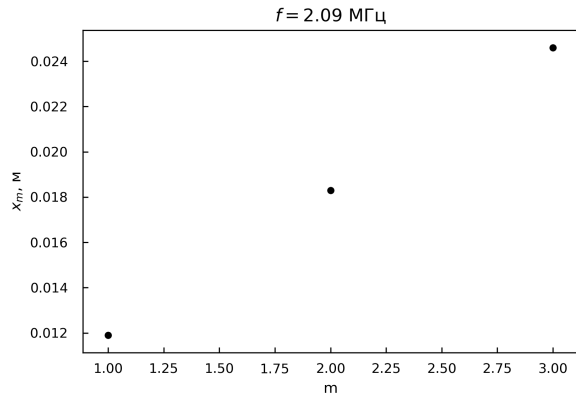


Рис. 9. Зависимость координаты от m

$$a = (63.5 \pm 0.6) \cdot 10^{-5}$$

$$\Lambda_{f_3} = (2.8 \pm 0.2) \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

4.

Рассчитаем скорость звука, пользуясь формулой:

$$v = \Lambda \nu,$$

где ν — частота колебаний кварцевого излучателя.

$f = 1.04 \text{ МГц}$	$v = (5.6 \pm 0.6) \cdot 10^3$
$f = 2.09 \text{ МГц}$	$v = (58.9 \pm 0.5) \cdot 10^2$
$f = 4.5 \text{ МГц}$	$v = (5.7 \pm 0.2) \cdot 10^3$

В. Определение скорости ультразвука методом темного поля

Рассчитаем цену малого деления окулярной шкалы.

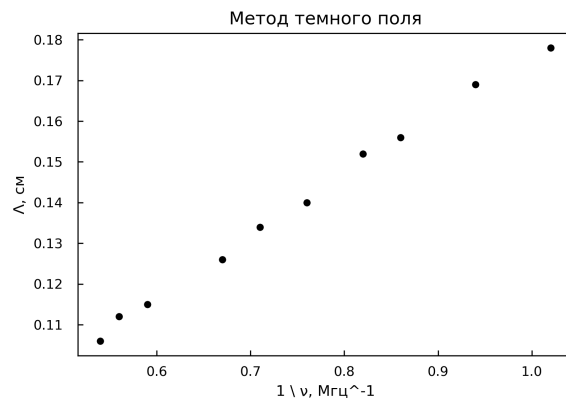
1 квадрату соответствует 25 делений, т. е. цена деления 0,04 мм.

Рассчитаем длину УЗ-волны Λ для всех исследуемых частот с учетом удвоения числа наблюдаемых полос.

ν , МГц	N , полос	x , дел микроскопа	Λ , см
0,98	7	2,4	0,178
1,07	10	3,25	0,169
1,16	11	3,3	0,156
1,22	12	3,5	0,152
1,31	13	3,5	0,14
1,41	13	3,35	0,134
1,5	14	3,4	0,126
1,7	16	3,55	0,115
1,77	16	3,45	0,112
1,85	17	3,45	0,106

Построим график $\Lambda = F(1/\nu)$.

Из графика $\Lambda = 1510/\nu$, т. е. скорость звука в воде $v = \Lambda \nu = 1510 \pm 70 \text{ м/с}$.



м/с. Методом темного поля $v = 1510 \pm 70 \text{ м/с}$. Табличному значению $v \approx 1500 \text{ м/с}$ соответствует значение, полученное вторым методом; значения, полученные первым методом, совпадают лишь по порядку величины - предположительно, это вызвано неточностью в установке.

VII. Вывод.

Было изучено явление дифракции света на примере ультразвуковой волны в жидкости.

Скорость ультразвука была определена двумя способами. По дифракционной картине при различных частотах $v = 5.6 \pm 0.6 \cdot 10^3$, $5.89 \pm 0.5 \cdot 10^3$, $5.7 \pm 0.2 \cdot 10^3$

-
- [1] *Максимычев А.В.* Лабораторный практикум по общей физике. Т.2. - М.:МФТИ, 2014
- [2] *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т.4. - М.:Наука, 1996