

Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа № 4.3.2
(Общая физика: оптика)

Дифракция света на ультразвуковой волне в жидкости

Работу выполнил:
Иванов Кирилл, 625 группа

г. Долгопрудный
2018 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.

1. 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:

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

Здесь $\Omega = 2\pi/\Lambda$ — волновое число для ультразвуковой волны, m — глубина модуляции n ($m \ll 1$).

Положим фазу φ 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 θ , соответствующими максимумам в дифракции Фраунгофера:

$$\Lambda \sin \theta_m = m\lambda$$

Этот эффект проиллюстрирован на рисунке 1.

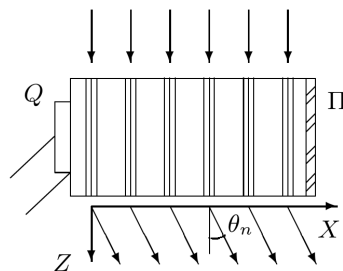


Рис. 1: Дифракция световых волн на акустической решетке

Зная положение дифракционных максимумов, по формуле (1) легко определить длину ультразвуковой волны, учитывая малость θ : $\sin \theta \approx \theta \approx l_m/F$, где l_m — расстояние от нулевого до последнего видимого максимума, F — фокусное расстояние линзы. Тогда получим:

$$\Lambda = m\lambda F/l_m$$

Скорость ультразвуковых волн в жидкости, где ν — частота колебаний излучателя:

$$v = \Lambda\nu$$

2. 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.

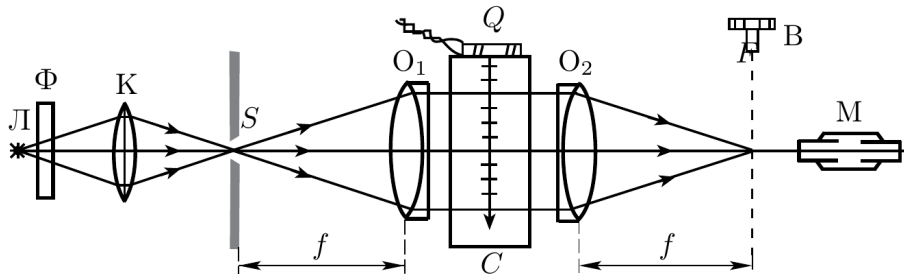


Рис. 2: Схема для наблюдения дифракции на акустической решетке

Параметры установки: фокусное расстояние объектива O_2 $F = 30$ см, одно деление винта микроскопа составляет 4 мкм, погрешность измерений примем равной $\sigma = 2$ деления, или 8 мкм.

Исследуем изменения дифракционной картины на зеленом свете. При увеличении частоты УЗ-генератора и приближении к 1,1 МГц проявляется дифракционная решетка: расстояние между максимумами растет.

Измерим положения x_m дифракционных максимумов с помощью микроскопического винта для четырех частот. Результаты измерений занесены в таблицы 1-4 ниже. На основе каждой таблицы построены графики зависимости $x_m(m)$, они изображены на рисунках 3-6. Коэффициенты углов наклонов прямых для всех зависимостей сведены в таблицу 5.

m	-3	-2	-1	0	1	2	3
x_m , дел	-115	-78	-37	0	38	74	106
x_m , мкм	-460	-312	-148	0	152	296	424

Таблица 1: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,168$ МГц

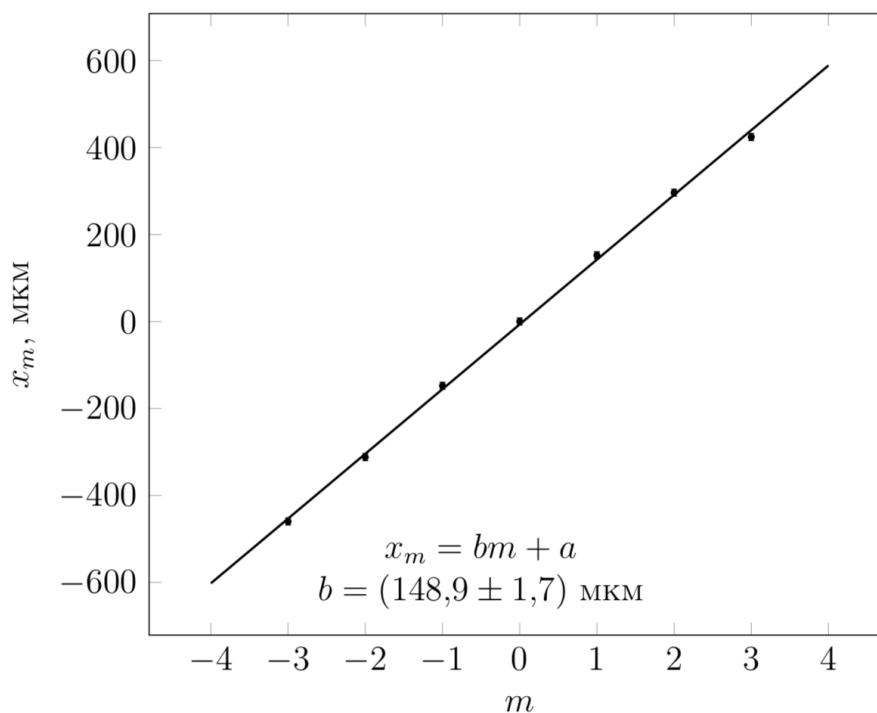


Рис. 3: График зависимости $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,168$ МГц

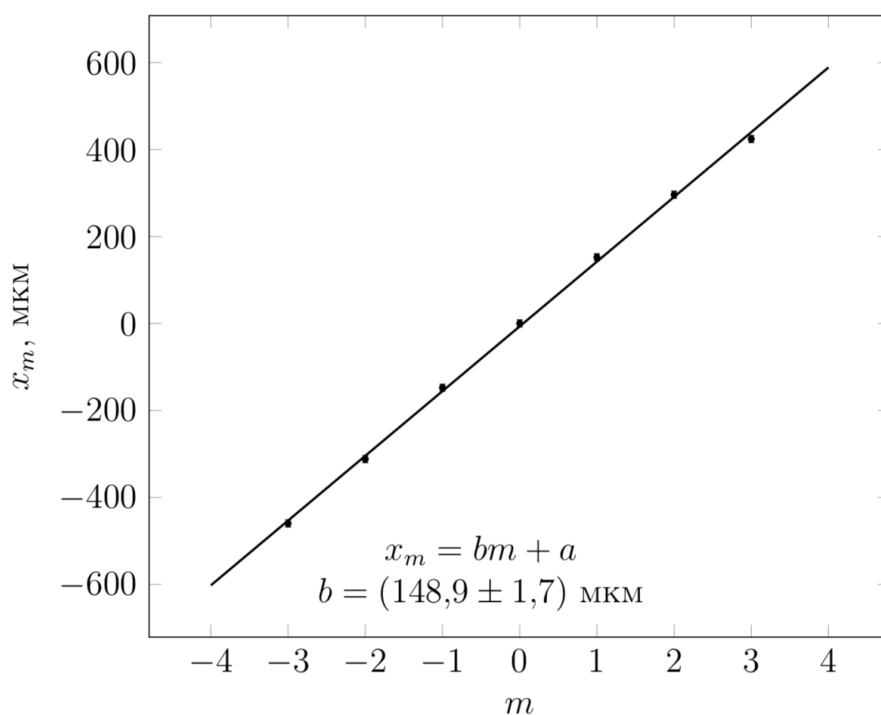
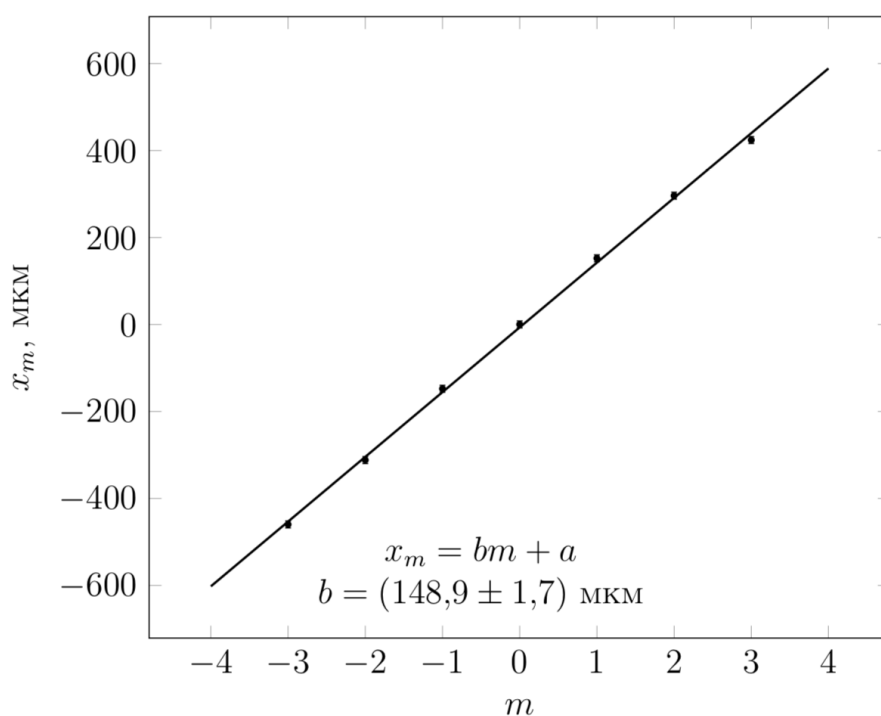
m	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
x_m , дел	-150	-116	-81	-38	0	38	80	120	154
x_m , мкм	-600	-464	-324	-152	0	152	320	480	616

Таблица 2: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,219$ МГц

m	-3	-2	-1	0	1	2	3
x_m , дел	-116	-80	-38	0	45	86	126
x_m , мкм	-464	-320	-152	0	180	344	504

Таблица 3: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,248$ МГц

Ошибка при определении Λ и v не превышает 2%. Согласно справочным данным, при комнатной температуре скорость ультразвуковой волны в воде составляет примерно 1490 м/с. Значения, полученные экспериментально, с достаточной точностью соотносятся с ними.

Рис. 4: График зависимость $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,219 \text{ МГц}$ Рис. 5: График зависимость $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,248 \text{ МГц}$

3. 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.

m	-2	-1	0	1	2
x_m , дел	-94	-43	0	45	85
x_m , МКМ	-376	-172	0	180	340

Таблица 4: Измерение координаты m -ого максимума x_m дифракционной картины при частоте генератора $\nu = 1,331$ МГц

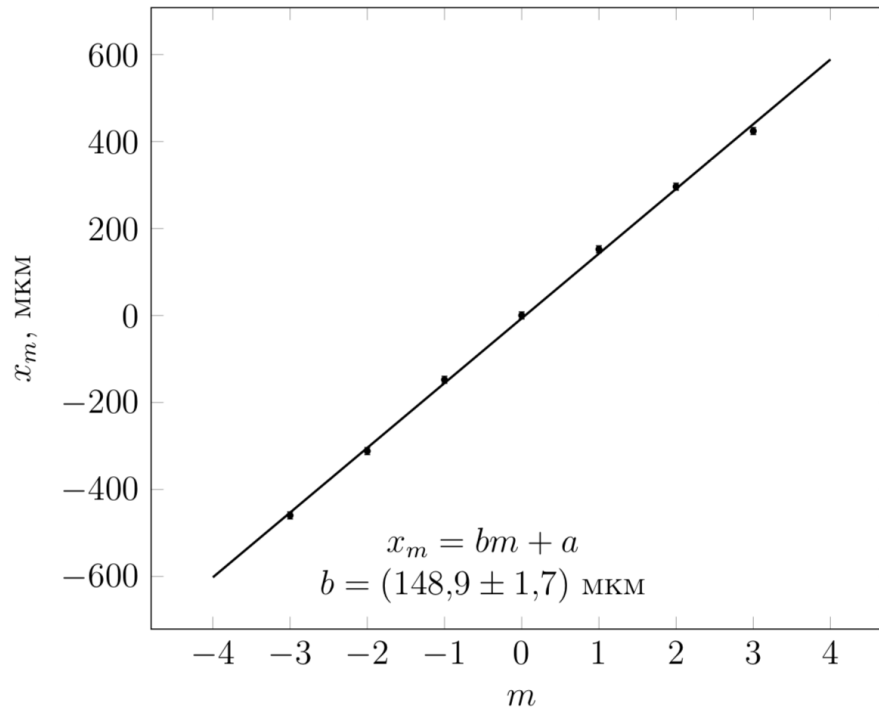


Рис. 6: График зависимости $x_m(m)$ при частоте генератора $\nu = 1,331$ МГц

ν , МГц	b , МКМ	σ_b , МКМ	Λ , МКМ	$\Delta\Lambda$, МКМ	v , м/с	Δv , м/с
1,168	148,9	1,7	1289	15	1507	17
1,219	154,8	1,3	1240	10	1512	12
1,258	163,0	1,4	1178	10	1482	13
1,331	178	3	1076	19	1432	26

Таблица 5: Вычисление длины ультразвуковой волны Λ и скорости распространения ее в воде v

Схема установки показана на рисунке 7.

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.

Без применения метода темного поля звуковая решетка не наблюдается. Закроем нулевой максимум горизонтальной нитью. Таким образом, осевая составляющая фазово-модулированной

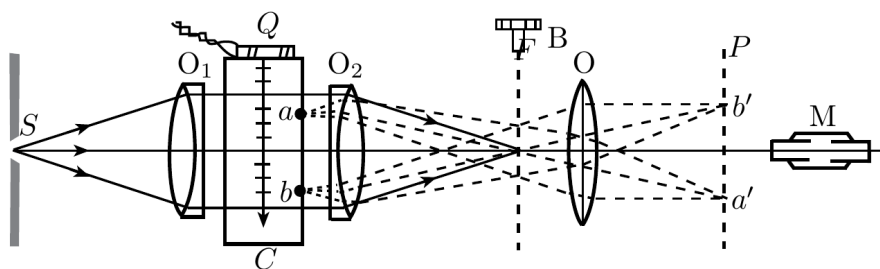


Рис. 7: Схема для наблюдения дифракции методом темного поля

волны поглощается, а боковые остаются без изменения. Получившееся поле:

$$f(x) = \frac{im}{2}e^{i\Omega x} + \frac{im}{2}e^{-i\Omega x} = im \cos \Omega x \Rightarrow I(x) = m^2 \cos^2 \Omega x = m^2 \frac{1 + \cos^2 2\Omega x}{2}$$

Отсюда получаем, что расстояние между темными полосами есть $\Lambda/2$.

Проведем измерение длины ультразвуковой волны, приняв ошибку равной цене деления окулярной шкалы. В таблице 6 содержатся количество маленьких делений окулярной шкалы N (цена деления $C = 0,06$), соответствующее n темным полосам акустической решетки. Формулы для расчета длины волны ультразвука Λ и скорости распространения v в воде:

$$\Lambda/2 = NC/(n - 1), \quad v = \nu \Lambda$$

Расчеты также приведены в таблице 6. Ошибка при таком определении скорости звука больше, чем в первой части работы, и составляет около 5%. Сами значения тоже получились больше.

ν , МГц	Количество делений шкалы окуляра N	Количество темных полос акустической решетки n	Λ , мм	v , 10 м/с	Δv , 10 м/с
1,220	150	15	1,29	157	7
1,259	150	16	1,20	151	8
1,271	175	18	1,24	157	8

Таблица 6: Вычисление длины ультразвуковой волны Λ и скорости распространения ее в воде v методом темного поля

4. Вывод

В работе изучена дифракция света на акустической решетки, рассчитаны длина волны ультразвука и скорость его распространения в воде. Решетка наблюдалась методом темного поля.