

Дифракция на спиральке

(10 баллов)

Введение

В эксперименте Розалинды Франклин, известной как «Фото 51» (Рис. 1), дифракция рентгеновских лучей на ДНК послужила открытию в 1952 году Уотсоном и Криком структуры ДНК в виде двойной спирали. В предлагаемом ниже эксперименте исследуется дифракция света на спиралевидных структурах.

Цель эксперимента

Определение геометрических параметров спиралевидных структур, используя методы дифракции.

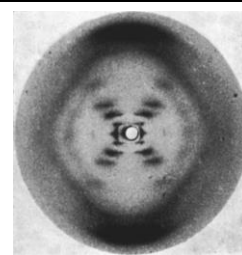


Рис. 1: Фото 51

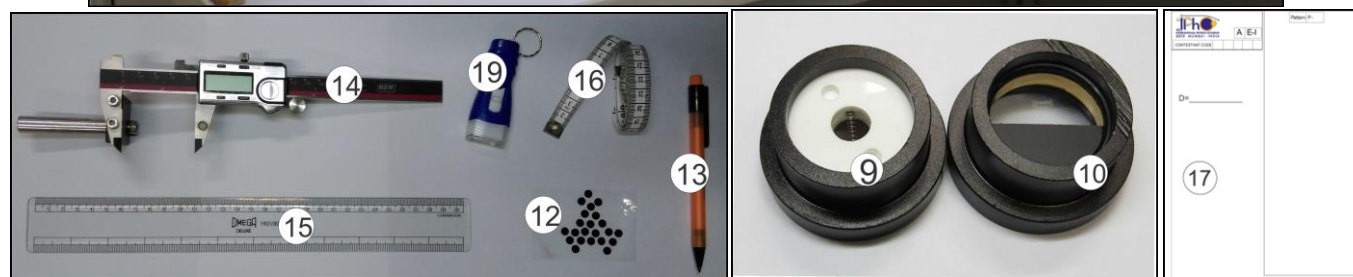
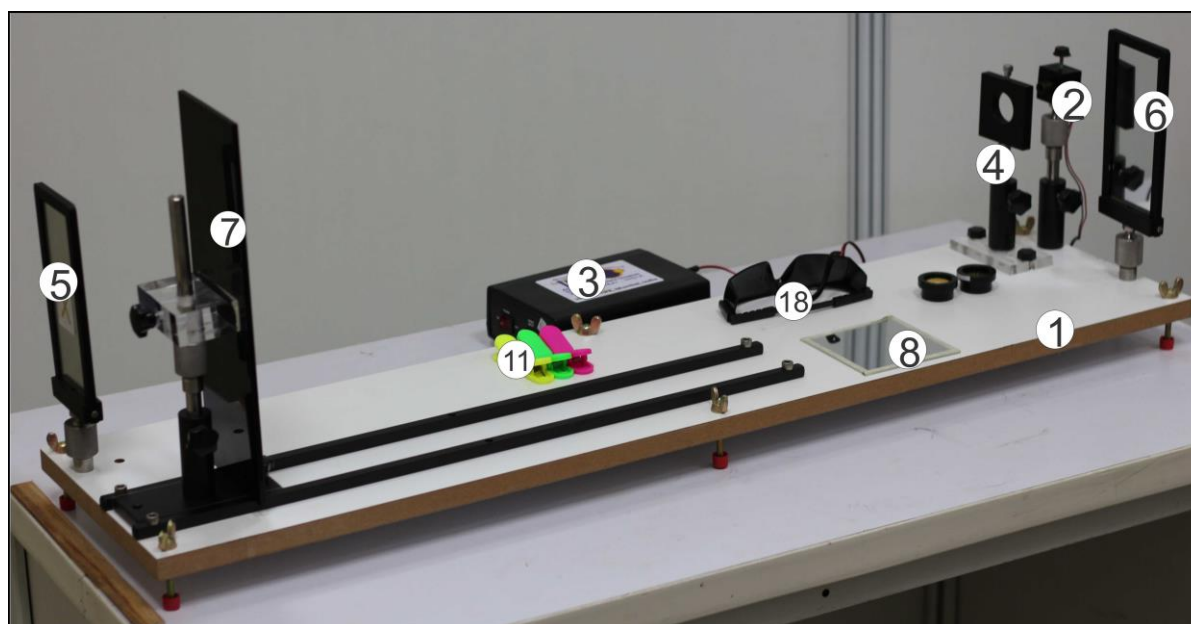


Рис. 2: Оборудования для части E-I

Список оборудования

[1]	Деревянная платформа	[11]	Прищепки
[2]	Лазер	[12]	Круглые черные наклейки
[3]	Источник питания для лазера	[13]	Карандаш
[4]	Держатель для исследуемых структур	[14]	Цифровой штангенциркуль
[5]	Левый отражатель (зеркало)	[15]	Линейка (30 см)
[6]	Правый отражатель (зеркало)	[16]	Измерительная лента (1.5 м)
[7]	Экран (10 см x 30 см)	[17]	Листы для отметок полученных изображений
[8]	Зеркало (10 см x 10 см)	[18]	Защитные очки
[9]	Структура I (спиралька)	[19]	Фонарик
[10]	Структура II (линии на стеклянной пластинке имитирующие структуру двойной спирали)		

Примечание: Элементы [1], [3], [14], [15], [16] и [18] также будут использоваться в части E-II.

Описание оборудования

Деревянная платформа [1]: Система из рельсов, лазера, отражателей, экрана и исследуемых структур закрепленных на ней.

Лазер [2]: Лазер с длиной волны $\lambda = 635 \text{ нм}$ ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) установленный на металлическом шаровом держателе [20] (Рис. 3), позволяющем корректировать направление пучка в пространстве X-Y-Z. Лазер можно поворачивать и закреплять в нужном направлении используя винт, расположенный с верхней стороны лазера. Лазерный пучок можно сфокусировать поворачивая металлический наконечник (как показано красной стрелкой на Рис. 3) для получения более четкого дифракционного изображения.

Источник питания [3]: На передней панели расположен переключатель «intensity (high/low)», разъем для подключения лазера и три USB выхода. На задней панели расположены выключатель и отверстие для кабеля. (изображение вверху рисунка 4).

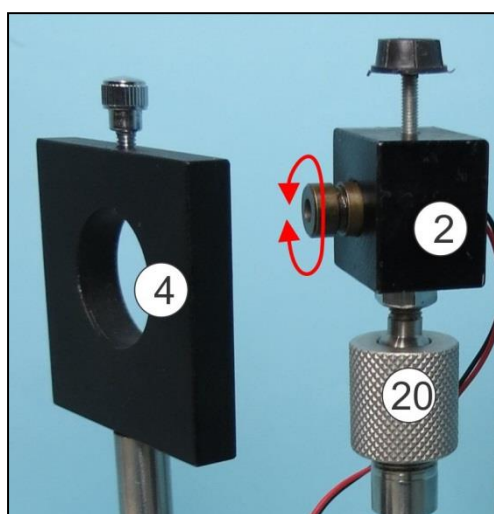


Рис. 3: Лазер и держатель исследуемых структур.
 [20]Металлический шаровой держатель.

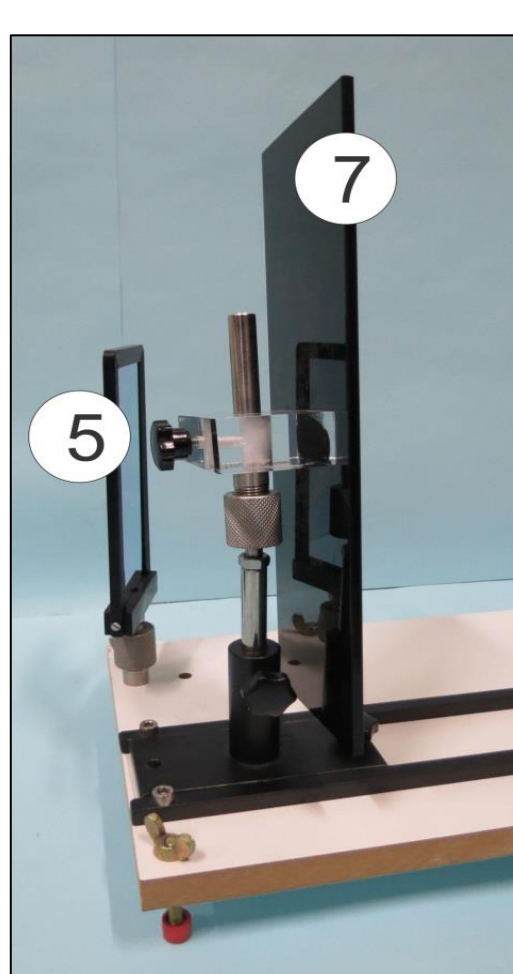


Рис. 5: Левый отражатель и экран



Рис. 4: Источник питания

Держатель исследуемых структур [4]: Исследуемые структуры можно зафиксировать в держателе с помощью винта, расположенного сверху (Рис. 3). Сам держатель можно поворачивать и перемещать по вертикали и горизонтали.

Левый отражатель [5]: Этот отражатель зафиксирован на деревянной платформе (Рис. 5). Не используйте сторону обозначенную крестиком X.

Правый отражатель [6]: Этот отражатель зафиксирован на деревянной платформе, но может быть снят (Его необходимо будет удалить для эксперимента E-II). Не используйте сторону обозначенную крестиком X.

Экран [7]: Экран закреплен на металлическом шаровом держателе вращающемся во всех направлениях (Рис. 5). Экран можно расположить как на Рис. 2 или по необходимости как показано на Рис. 6.

Структура I [9]: Спиралька помещенная в полости белого круглого пластика.

Структура II [10]: Линии, имитирующие структуру двойной спирали, начерченные на стеклянной пластинке, помещенной в круглый пластик.

Цифровой штангенциркуль [14]:

Цифровой штангенциркуль с металлическим стержнем на конце (металлический стержень будет использоваться в эксперименте E-II). У штангенциркуля имеется выключатель On/Off, кнопка сброса показаний на ноль, выбор единиц измерения (mm/inch) мм/дюймы (используйте только мм), фиксирующий винт и ролик для перемещения правого плеча штангенциркуля. Цифровым штангенциркулем нужно производить измерения на листах с отметками от изображений.

Листы для отметок полученных изображений [17]: Выданные листы для отметок полученных изображений могут быть сложены вдвое и прикреплены к экрану с помощью пластиковых прищепок. Необходимо чтобы дифракционное изображение полностью помещалось в границы прямоугольника листа для отметок.

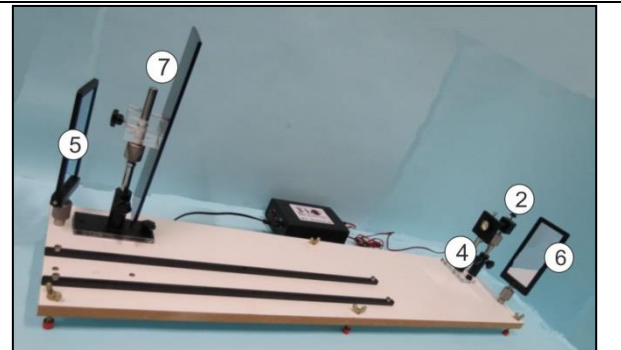


Рис. 6: Альтернативное к рисунку 2 расположение экрана

Теория

Лазерный луч с длиной волны λ , падая перпендикулярно на цилиндрическую проволоку с диаметром a , создает дифракционный эффект. В результате на экране наблюдается картина с распределением интенсивности, как показано на Рис. 7.



Рис. 7: Схематическое изображение дифракционной картины, получаемой от одной цилиндрической проволоки с диаметром a .

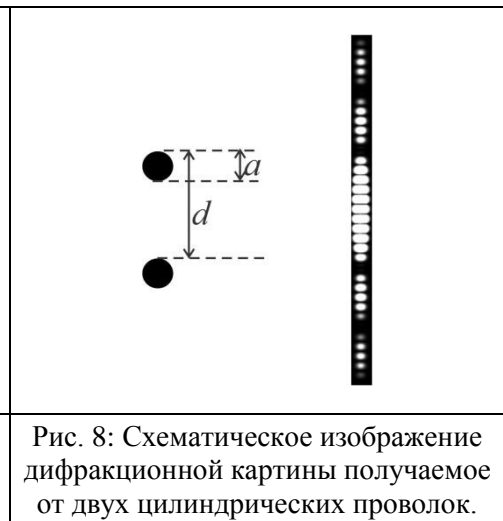


Рис. 8: Схематическое изображение дифракционной картины получаемой от двух цилиндрических проволок.

Распределение интенсивности в зависимости от угла θ описывается следующим уравнением

$$I(\theta) = I(0) \left[\frac{\sin \beta}{\beta} \right]^2 \quad \text{где } \beta = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$$

В центре наблюдается яркое пятно, для других углов ($\beta \neq 0$), когда $\sin \beta$ равен нулю, интенсивность обнуляется. Расположение n -го минимума интенсивности наблюдаемого под углом θ_n , дается выражением

$$\sin \theta_n = \pm n \frac{\lambda}{a}, \quad n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$$

Где \pm соответствуют обоим расположениям относительно центрального пятна ($\theta = 0$).

Дифракционное изображение от двух одинаковых цилиндрических проволок, расположенных параллельно на расстоянии d друг от друга (Рис. 8), является результатом наложения двух эффектов (дифракции от каждой из проволок и интерференции от двух проволок). В результате распределение интенсивности для такого случая описывается уравнением,

$$I(\theta) = I(0) \cos^2 \delta \left[\frac{\sin \beta}{\beta} \right]^2$$

где $\delta = \frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}$, $\beta = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$

На экране, расположенном на большом расстоянии D от проволок, положения минимумов на экране наблюдается в местах $x_{\pm n} = \pm n \frac{\lambda D}{a}$ от дифракционного эффекта и $x_{\pm m} = \pm \left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda D}{d}$ из-за явления интерференции (где $m, n = 1, 2, 3, 4, 5 \dots$).

Аналогично для системы из четырех одинаковых проволок (Рис.9), получаемое распределение интенсивности является результатом наложения дифракции от каждой из проволок и интерференции от пар проволок, и поэтому определяются параметрами a , d и s . Другими словами от такой системы наблюдается дифракционная картина, которая является комбинацией дифракционных картин с тремя различными распределениями минимумов интенсивности.



Рис. 9: Система из четырех проволок

Начальная настройка оборудования

1. Включите лазер и настройте оба отражателя так чтобы на экране наблюдалось пятно от лазера.
2. Используя пластиковую линейку установите лазер и отражатели так чтобы лазерный луч был параллелен деревянной платформе.
3. Необходимо чтобы пятно от лазера падало вблизи от центра экрана.
4. Выключите лазер. Прикрепите к экрану лист для отметки изображений.
5. С помощью прищепок прикрепите зеркало к экрану и снова включите лазер.
6. Подкорректируйте экран так чтобы лазерный луч идеально вернулся назад к лазеру. После завершения корректировки уберите зеркало с экрана.
7. Включайте/выключайте освещение в кабинке по мере необходимости.

Эксперимент

Часть А: Определение геометрических параметров спиральки

Структура I представляет собой спиральку радиусом R , шагом P и толщиной a_1 как показано на Рис. 10(a). При виде сбоку, структура эквивалентна двум системам параллельных проволок одинаковой толщины с расстоянием d_1 от друг от друга и углом $2\alpha_1$ между системами (Рис. 10(b)).

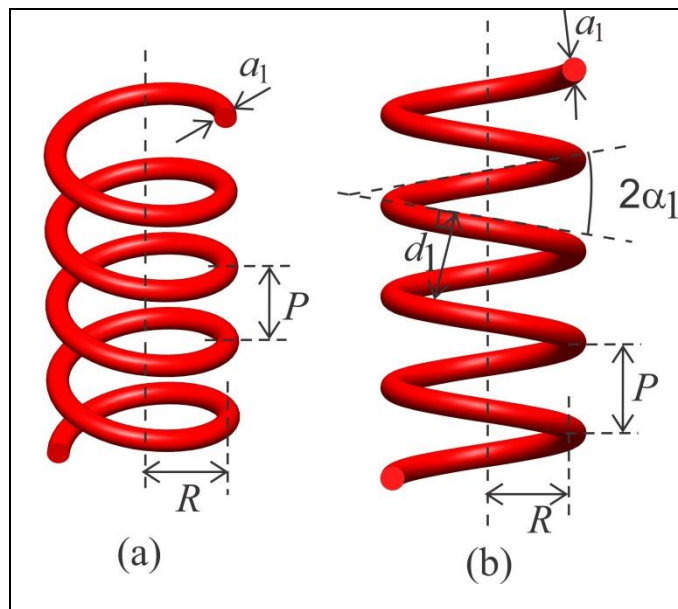


Рис. 10: (a) Обычный вид спиральки
(b) Схематический вид спиральки сбоку

- Поместите структуру I в держатель, убедившись, что спиралька расположена вертикально. Получите четкое X-образное дифракционное изображение на листе для отметки изображений.
- Для этого возможно понадобится настройка следующих параметров
 - Сфокусировать лазерный луч (вращая металлический наконечник на лазере)
 - Подкорректировать направление луча (так чтобы лазерный луч падал только на два витка спиральки)
 - Выбор интенсивности лазера (high/low переключатель на источнике питания)
 - Внешнее освещение (включая/выключая свет в кабине)

В случае, если центральный максимум очень яркий, для того чтобы уменьшить рассеяние, вы можете прилепить круглые черные стикеры на листы для отметок изображений.

Пункты	Задания	Баллы
A1	Для определения параметров a_1 и d_1 на листе для отметки изображений, с помощью выданного карандаша [13] нанесите положения наблюдаемых минимумов интенсивности с обеих сторон от центрального пятна. Пожалуйста, пронумеруйте листы с отметками от изображений как P-1, P-2 и т.д.	0.7
A2	Для определения a_1 произведите необходимые измерения расстояний, используя цифровой штангенциркуль. Результаты запишите в Таблицу A1.	0.5
A3	Постройте график в подходящих координатах. Обозначьте его как График A1. Из коэффициента наклона прямой определите параметр a_1 .	0.7
A4	Для определения d_1 произведите необходимые измерения расстояний и запишите их в Таблицу A2.	0.8
A5	Постройте график в подходящих координатах. Обозначьте его как График A2. Из коэффициента наклона прямой определите параметр d_1 .	0.6
A6	Используя X-образное изображение, определите угол α_1 .	0.2
A7	Выразите P через d_1 и α_1 . Найдите значение P .	0.2
A8	Выразите R через параметры P и α_1 . Найдите значение R (параметром a_1 можно пренебречь).	0.2

Часть В: Определение геометрических параметров структуры в виде пары спиралей

На Рис. 11(a) показаны два витка структуры из пары спиралей. На Рис. 11(b) показана та же структура из пары спиралей с видом сбоку. Каждая из спиралей характеризуется толщиной a_2 углом $2\alpha_2$ и расстоянием d_2 между витками. Расстояние между двумя спиральями s . Структура II представляет собой линии, имитирующие структуру двойной спирали, начерченные на стеклянной пластинке (Рис. 12), так что дифракционная картина от такой системы схожа с получаемой дифракционной картиной от структуры из пары спиралей. В этой части, вы будете определять геометрические параметры структуры II.

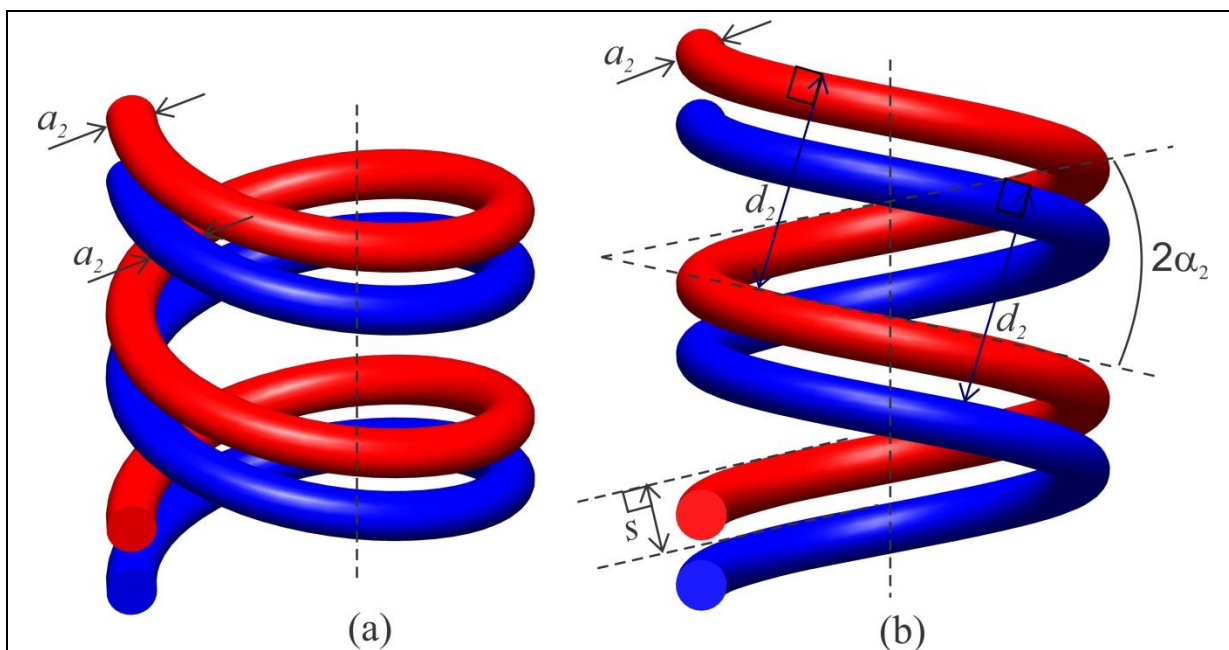


Рис. 11: (a) Обычный вид системы из пары спиралей (b) Схематическое изображение системы из пары спиралей при виде сбоку.

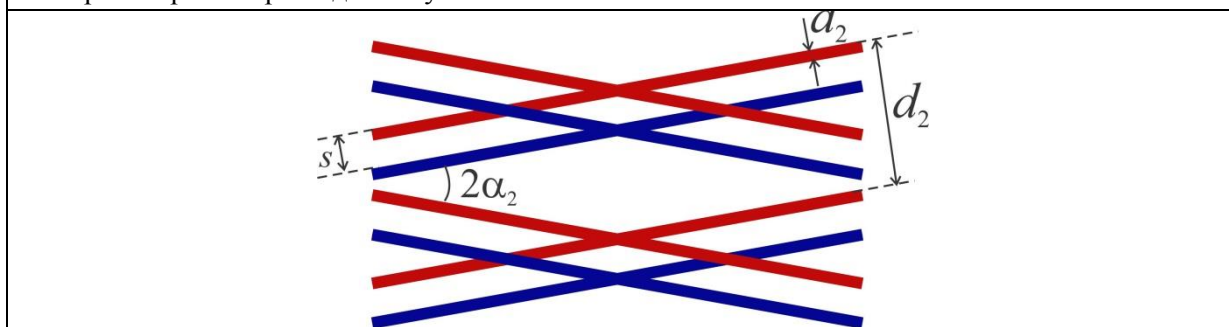


Рис. 12: Линии структуры II, имитирующие систему из пары спиралей

- Поместите структуру II в держатель.
- Прикрепите к экрану новый лист для отметки изображений.
- Получите четкое X-образное дифракционное изображение на экране.

Пункты	Задания	Баллы
V1	Для определения параметров a_2 , s и d_2 сперва нанесите положения минимумов по обе стороны от центрального пятна. Вы можете использовать более одного листа для отметки изображений.	1.1
V2	Для определения a_2 произведите измерения необходимых расстояний и занесите их в Таблицу V1.	0.5
V3	Постройте график в подходящих координатах. Назовите его График V1. Из коэффициента наклона прямой определите значение параметра a_2 .	0.5
V4	Для определения параметра s произведите измерения необходимых расстояний и	1.2

	запишите из в Таблицу В2.	
B5	Постройте график в подходящих координатах. Назовите его В2. Из коэффициента наклона прямой определите значение параметра s .	0.5
B6	Для определения параметра d_2 произведите измерения необходимых расстояний и запишите из в Таблицу В3.	1.6
B7	Постройте график в подходящих координатах. Назовите его В3. Из коэффициента наклона прямой определите значение параметра d_2 .	0.5
B8	Используя X-образное изображение, определите угол α_2 .	0.2

Дифракция света на поверхностных волнах

Введение

Формирование и распространение волн на поверхности жидкости является важным и хорошо изученным явлением. Для таких волн возвращающая сила, действующая на колеблющуюся жидкость, возникает частично благодаря действию силы тяжести и частично благодаря силам поверхностного натяжения. Если длина волны меньше критического значения λ_c , то влиянием гравитационных сил можно пренебречь, а учитывать только силы поверхностного натяжения ($\lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}}$ где σ - поверхностное натяжение, ρ - плотность жидкости, g – ускорение свободного падения). Такие волны называются капиллярными.

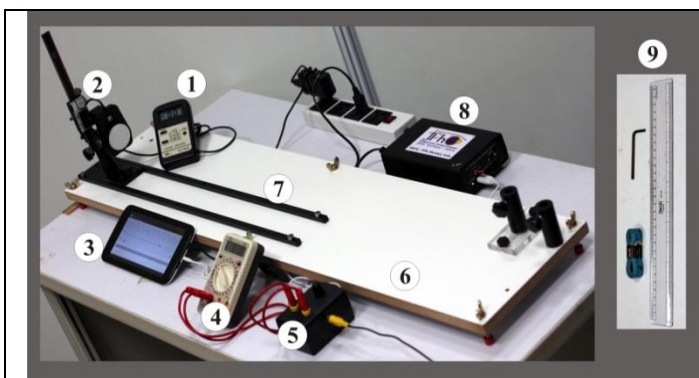
В этой части задания вам необходимо исследовать капиллярные волны, длины волн которых меньше, чем λ_c . Поверхностное натяжение – свойство жидкости, благодаря которому поверхность жидкости ведет себя подобно натянутой мембране. Если возмутить поверхность жидкости, то это возмущение подобно волнам на мембране. В качестве источника волн используется электрический вибратор. Когда лазерный пучок падает на поверхность под малым углом на эти волны, то поверхность жидкости действует как отражающая дифракционная решетка, формируя хорошо видимую дифракционную картину.

Капиллярные волны затухают по мере их распространения (т.е. их амплитуда уменьшается). Это затухание обусловлено вязкостью жидкости, приводящей к появлению сил сопротивления между слоями движущейся жидкости.

Цель работы.

Используя дифракцию света на капиллярных поверхностных волнах, определить поверхностное натяжение и вязкость выданной воды.

Список оборудования.



[1]	Измеритель интенсивности света (подключенный к блоку фотоприемника)
[2]	Фотоприемник, соединенный с цифровым штангенциркулем и размещенный на держателе
[3]	Миникомпьютер (планшет), используется как генератор синусоидального сигнала
[4]	Цифровой мультиметр
[5]	Блок управления вибратором
[6]	Деревянная платформа
[7]	Направляющие рельсы для блока фотоприемника
[8]	Регулируемый источник постоянного тока
[9]	Шестигранный ключ, мерная лента и пластиковая линейка

Рисунок 1: Комплект с деревянной платформой



Рисунок 2 : Комплект вибратор/лазерный источник

Описание оборудования

а) Планшет, как источник синусоидального сигнала

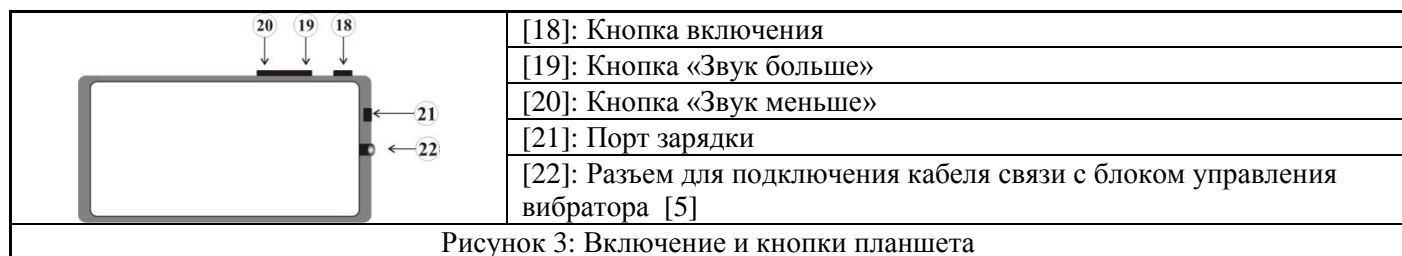


Рисунок 3: Включение и кнопки планшета

- Замечания
- Держите всегда планшет в состоянии зарядки
 - Плавно нажмите кнопку включения для перевода дисплея в начальное состояние
 - Держите выходной сигнал на максимуме, используя кнопку «Звук больше»[19].

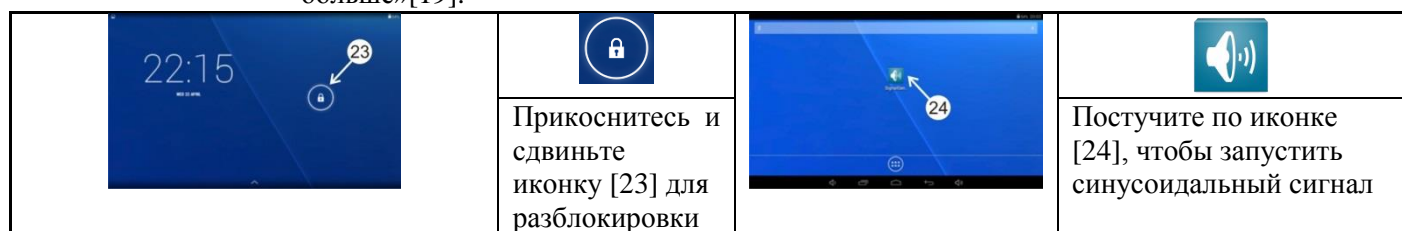


Рисунок 4 4: Начальный установки дисплея планшета

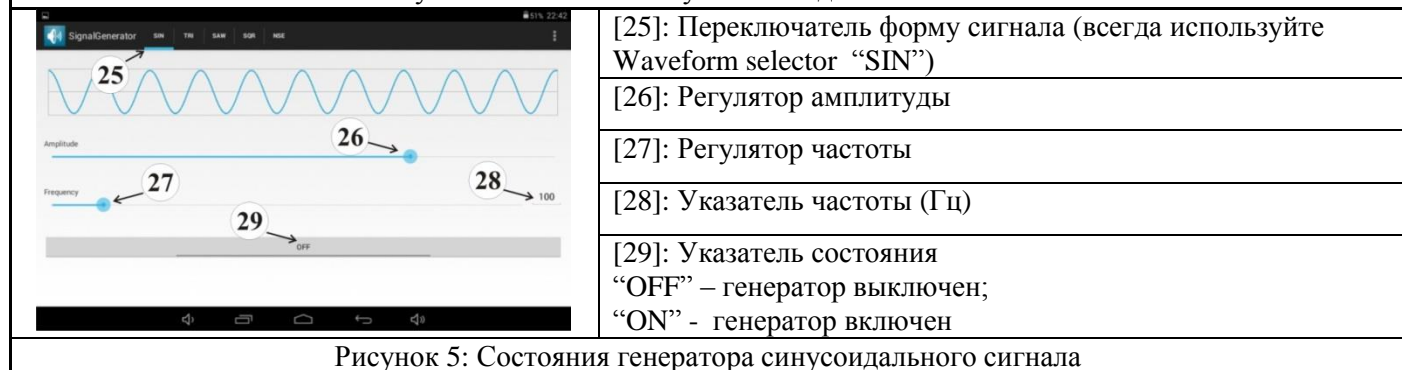


Рисунок 5: Состояния генератора синусоидального сигнала



Для изменение частоты

- Постучите по полю указателя частоты [28] для появления числовой клавиатуры (Рис. 5)
- Используя кнопку «backspace» [30], сотрите величину частоты
- Введите требуемую частоту и нажмите кнопку “Finished” [31]

Рисунок 6: Экран при установке частоты сигнала

Чтобы изменить амплитуду сигнала

- Используйте слайдер [26] на планшете, или регулятор [33] на блоке управления вибратором [5].

в) Блок управления вибратором, цифровой мультиметр, регулируемый источник постоянного тока и их соединения

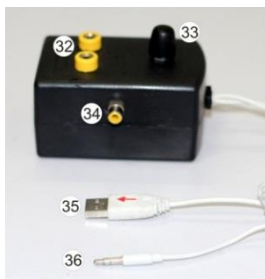


Рис. 7: Блок управления вибратором[5]



Рис. 8: Блок вибратора [11]

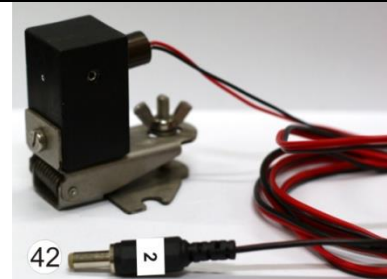


Рисунок 10: Лазерный источник 2 [15] (помещенный в металлическую коробку) с соединительным кабелем [42]

[32]: Разъемы для подключения кабелей от мультиметра

[33]: Регулятор амплитуды синусоидального сигнала

[34]: Разъем для подключения кабеля от блока вибратора

[35]: USB порт для подключения регулируемого источника постоянного тока

[36]: Аудиоразъем для подключения планшета

[37]: Пластина вибратора

[38]: Разъем кабеля блока вибратора



[39]: AC/DC переключатель переменного постоянного тока

[40]: Кнопка выбора диапазона

[41]: Входные гнезда

Рис. 9: Цифровой мультиметр[4]



Рис. 11: Регулируемый источник постоянного тока [8]

[43]: Регулятор интенсивности (держат в положении “High”)

[44]: USB разъем для USB кабеля от блока управления вибратором

[45]: Разъем для подключения лазерного источника 2



с) Блок измерения интенсивности света и фотоприемник



Начальная настройка



1. Отключите лазер 1 и подключите лазер 2 к регулируемому источнику постоянного тока. Замечание. Лазер 2 уже установлен под нужным углом. Не трогайте лазерный источник!
2. Снимите правый отражатель, использованный в части E-1, открутив винт по деревянной платформе (Рис. 15)
3. Снимите экран, использованный в части E-1 и вставьте блок фотоприемника в подставку для экрана. Поставьте держатель экрана между направляющими рельсами.
4. Расположите деревянную платформу [6] так, чтобы ее опорные винты касались деревянной планки, которая прикреплена к столу (рис. 16).
5. Поднимите боковую пленку полиэтиленового чехла. Используя мензурку [17], налейте в кювету [12] точно 500 мл воды.

6. Включите лазер. Найдите отражённое пятно лазера на фотоприемнике. Перемещая блок светового датчика вперед и назад между направляющими, убедитесь в том, что лазерное пятно смещается вертикально, а не под углом к вертикали. Небольшая боковая настройка деревянной платформы и вертикальное перемещение блока фотоприемника позволит вам направить лазерное пятно точно на отверстие. Показания измерителя интенсивности максимальны, если центр лазерного пятна совмещается с центром отверстия.
7. Полоска вибратора уже расположена в правильном вертикальном положении. Если необходимо, используйте черный винт блока регулировки высоты [14] для точных настроек (Рис.17).
8. Блок вибратора можно перемещать горизонтально вперед и назад. Указатель показывает положение блока на линейке [10].
9. При измерениях убедитесь, что пленка полиэтиленового чехла расположена внизу для защиты водной поверхности от воздушных потоков.

Эксперимент

Часть С: Измерение угла θ между лазерным лучом и поверхностью воды.

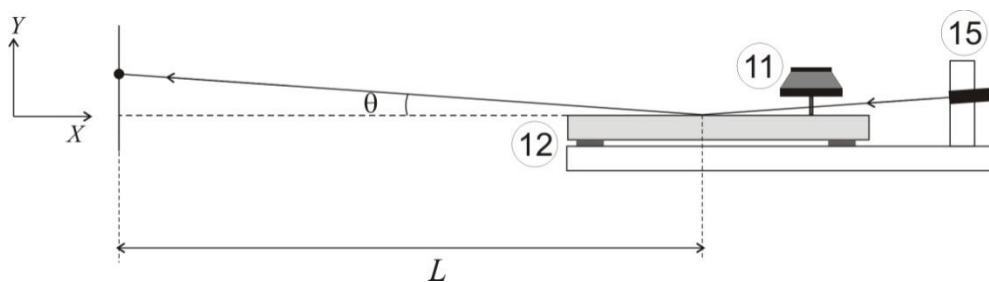


Рис. 18: Измерение угла θ

Пункты	Задание	Баллы
C1	Передвигая блок фотоприемника с подходящим шагом, измерьте зависимость смещения пятна Y от смещения X блока фотоприемника. Запишите полученные данные в Таблицу C1. Используйте подходящий диапазон измерения интенсивности света.	1.0
C2	Постройте соответствующий график (обозначьте его Graph C1) и по коэффициенту его наклона определите угол θ (в градусах)	0.6

Часть D: Определение поверхностного натяжения σ выданной воды

Из теории дифракции можно показать, что справедлива формула

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_L} \sin\theta \sin\gamma \quad (1)$$

где, $k = 2\pi/\lambda_w$ - волновое число капиллярной волны, λ_w и λ_L - длины волн капиллярной и световой волн, соответственно; γ - угловое расстояние между центральным максимумом и максимумом первого порядка (Рис. 19).

Частота капиллярной волны связана (f) связана с ее волновым числом k соотношением

$$\omega = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} k^q \quad (2)$$

где, $\omega = 2\pi f$, ρ - плотность воды, q - целое число.

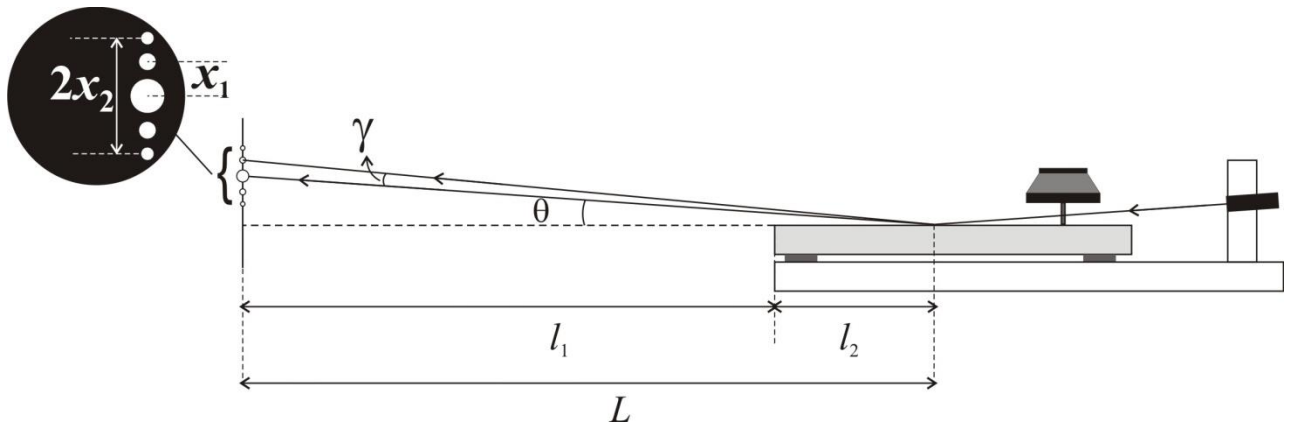


Рисунок 19: Схема установки.

1. Зафиксируйте блок фотоприемника [2] (используя винт в держателе) на конце направляющих рельсов, в положении, показанном на рис.1

вопрос	Описание	Баллы
D1	Измерьте длину l_1 между фотоприемником и концом кюветы с водой. Вы должны увидеть световую полосу, где лазерный луч попадает на поверхность воды. Центр этой полосы есть точка падения луча на поверхность воды. Измерьте расстояние l_2 , от точки падения луча до края кюветы. Определите расстояние L . Запишите полученные значения в лист ответов.	0.3

2. Установите показатель положения блока вибратора в положение 7.0 см на горизонтальной шкале [10].
3. Установите частоту синусоидального сигнала 60 Гц и подберите такое значение амплитуды сигнала, чтобы максимумы первого и второго порядков были четко видны на дифракционной картине. (Рис. 19).

Пункты	Задание	Баллы
D2	Измерьте расстояние между максимумами второго порядка, расположенными выше и ниже центрального максимума. Вычислите значение x_1 . Запишите полученные значения в таблицу D1. Проведите аналогичные измерения, увеличивая частоту колебаний с подходящим шагом.	2.8
D3	Выберите соответствующие переменные величины, для графика, которые позволят по его наклону определить величину q . Приведите выбранные переменные величины в таблице D2. Постройте график для определения q (подпишите его Graph D1). Запишите уравнение (2) с соответствующим целым числом q .	0.9
D4	Используя уравнение (2), выберите подходящие переменные величины для графика, по наклону которого можно определить величину σ . Занесите значения выбранных переменных в таблицу D3. Постройте график для определения σ (подпишите его Graph D2) и рассчитайте ее. (Плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$).	1.2

Часть Е: Определение коэффициента затухания δ и вязкости воды η

Капиллярные волны на поверхности затухают из-за вязкости воды. Амплитуда волны h , уменьшается экспоненциально с расстоянием s до источника (вибратора)

$$h = h_0 e^{-\delta s} \quad (3)$$

где h_0 – амплитуда волны у вибратора, δ - коэффициент затухания.

Экспериментально установлено, что амплитуда h_0 связана напряжением V_{rms} , приложенным к вибратору соотношением

$$h_0 \propto (V_{rms})^{0.4} \quad (4)$$

Коэффициент затухания связан с вязкостью жидкости соотношением

$$\delta = \frac{8 \pi \eta f}{3 \sigma} \quad (5)$$

где, η - вязкость жидкости.

1. Установите вибратор в положение 8.0 см.
2. Установите частоту 100 Гц.
3. Настройте блок фотоприемника (с помощью движка штангенциркуля) так, чтобы пятно дифракционного максимума первого порядка попадало точно на входное отверстие.
4. Подберите амплитуду синусоидального сигнала V_{rms} , такой, чтобы показания измерителя интенсивности были равны 100 в режиме А. Запишите измеренное значение V_{rms} .
5. Отодвигайте вибратор от точки падения луча с шагом 0.5 см и для каждого положения подберите значения V_{rms} такие, чтобы показания измерителя интенсивности света были равны 100. Запишите полученные значения V_{rms} .

Пункты	Задания	Баллы
E1	Запишите полученные данные на каждом шаге в таблицу E1.	1.9
E2	Постройте соответствующий график (обозначьте его Graph E1) и по его наклону определите постоянную затухания δ .	1.0
E3	Рассчитайте значение вязкости η выданной воды.	0.3