

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО

Физический факультет

О.В. Белова, Е.В. Зайцева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки
03.03.02 «Физика», 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»,
28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»,
09.03.02 «Информационные системы и технологии»

Нижний Новгород
2022

УДК 534.01(076)
ББК 22.313я73-4
Б 43

Белова О.В., Зайцева Е.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2022. – с.

Рецензент: к.ф.-м.н., доцент А.А. Перов

Практикум содержит описание лабораторной работы, предназначенной для студентов второго курса физического факультета Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Целью работы является изучение студентами основных волновых явлений в поддержку курса общей физики.

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии
физического факультета ННГУ, к.ф.-м.н., доцент Перов А.А.

УДК 534.01(076)
ББК 22.313я73-4

© **Национальный Исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2022**

Цель работы:

- Изучение волновых процессов на примере волн, возбуждаемых на поверхности воды.
- Измерение скорости распространения поверхностных волн.
- Изучение явлений интерференции и дифракции поверхностных волн на различных препятствиях.

1. Исследование интерференции поверхностных волн.

Интерференция является одним из фундаментальных явлений, присущих волнам различной природы (акустическим, электромагнитным, волнам на поверхности жидкости, плазменным волнам и др.) [1-3]. Это явление хорошо наблюдать в опытах по интерференции волн на поверхности жидкости, поскольку поверхностные волны обладают всеми свойствами, присущими всем остальным видам волн.

? *Дайте определение явлению интерференции. Какие волны называются когерентными?*

В данной работе явление интерференции наблюдается при сложении волн, источниками которых являются волны, возбуждаемые пульсирующим воздухом. При этом на экране лабораторной установки в местах увеличения амплитуды, волновые поверхности имеют меньшую освещенность, а в местах ослабления амплитуды – бóльшую освещенность.

Получим условия наблюдения максимумов и минимумов интерференции. Рассмотрим два точечных источника. Источники находятся на расстоянии $2d$ друг от друга. Каждый из источников возбуждает круговую волну.

? *Дайте определение круговых волн.*

Складываясь, круговые волны дают интерференционную картину. Если пренебречь затуханием, то волна от каждого источника может быть записана следующим образом:

$$s_1=A_1\cos(\omega t - kr_1+\varphi_{01}); \quad s_2=A_2\cos(\omega t - kr_2+ \varphi_{02}),$$

где A_1 и A_2 - амплитуды волн, r_1 и r_2 - расстояния соответственно от первого и второго источника, k – волновое число, $k = \omega/V$, V - скорость распространения волн, ω – круговая частота волны.

Если амплитуды волн, испускаемых обоими источниками одинаковы, т.е. $A = A_1 = A_2$, и разность фаз $\Delta\varphi = \varphi_{02} - \varphi_{01}$ не зависит от времени, то смещение

точек поверхности жидкости в точке М (см. рис. 1) можно рассматривать как результат сложения волн S_1 и S_2 :

$$s = s_1 + s_2 = 2A \cos[k(r_2 - r_1)/2 + \Delta\varphi/2] \cos[\omega t - k(r_1 + r_2)/2 + (\varphi_{02} + \varphi_{01})/2] \quad (1).$$

Величину $\Delta r = r_2 - r_1$ называют разность хода.

! Выражение (1) соответствует случаю сложения идеальных монохроматических волн. Реальные же волны являются медленно меняющимися функциями времени, т.е. квазигармоническими. Заметные изменения этих функций происходят за промежуток времени

$$\tau \gg T = \frac{2\pi}{\omega}$$

называемый временем когерентности. Однако, если оба источника приводятся в колебательное движение одним вибратором, разность фаз $\Delta\varphi$ в (1) остается постоянной.

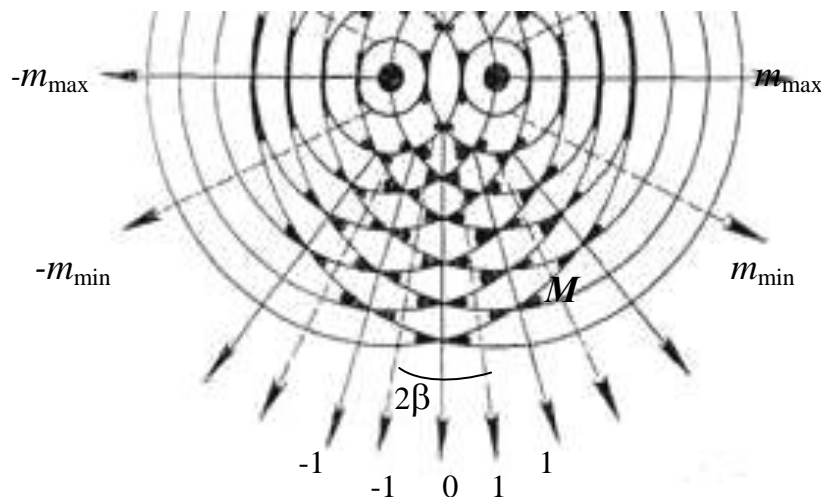


Рисунок 1. Интерференция круговых волн поверхностных волн

Линии со стрелками указывают геометрическое место точек, где наблюдается максимумы m -го порядка (сплошные линии) и минимумы интерференции m -го порядка (штриховые линии).

Из выражения (1) можно увидеть, что существуют точки на поверхности жидкости, где волны интерферируют в противофазе и колебания в этих точках отсутствуют $s=0$ (так называемые узлы или минимумы интерференции). Для этих точек справедливо условие:

$$\cos(k\Delta r/2) = -1 \quad (2)$$

здесь $\Delta\varphi=0$.

? *Объясните, почему в условиях данной экспериментальной установки можно использовать условие $\Delta\varphi=0$?*

Тогда из (2) можно получить:

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \lambda (m + 1/2),$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

Из выражения (1) видно, что существуют точки на поверхности жидкости, где волны интерферируют в фазе и колебания в этих точках происходят с удвоенной амплитудой $2A$ (пучности или максимумы интерференции). Условие наблюдения максимумов интерференции:

$$\cos(k\Delta r/2)=1$$

Откуда разность хода

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \lambda m ,$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ порядок (номер) максимума.

Разность хода можно записать выражением:

$$\Delta r = \sin(\beta) * 2d \tag{3}$$

где β - угол под которым наблюдается максимум или минимум интерференции m -го порядка относительно оси симметрии (см. рис.1), называемый углом интерференции.

? *Получите выражение (3) самостоятельно.*

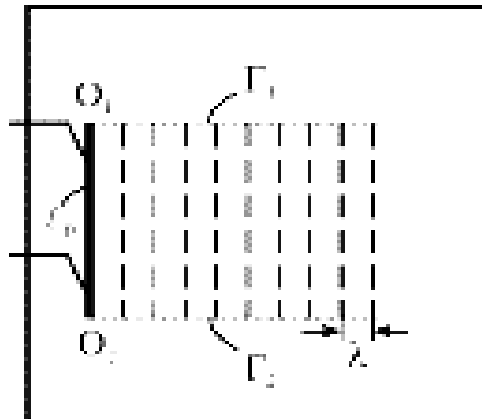
Дифракция плоской поверхностной волны

В узком смысле дифракция – это явление, при котором проявляется отступление от прямолинейного распространения волн. Такое понимание дифракции, вообще говоря, неверно, поскольку прямолинейное распространение волн является лишь определенным приближением. На самом деле колебание, возникнув вначале в ограниченной области, стремится распространиться во все стороны. Выбором специальной формы этой области можно добиться того, что волна побежит преимущественно в определенном направлении.

Если в качестве источника волны использовать пластину, длина которой заметно превышает длину волны, то в результате по поверхности воды побежит

"плоская" волна в направлении, перпендикулярном пластине (рис.2). Отчетливо наблюдаются две прямолинейные границы Γ_1 и Γ_2 , отделяющие возмущенную волной и гладкую части поверхности воды. Для этой последней части можно употребить заимствованный из оптики термин: "область геометрической тени". В этом эксперименте можно считать, что волна распространяется прямолинейно и не заходит в область тени. Это связано с тем, что размер ее волнового фронта много больше длины волны.

? Дайте определение волнового фронта.



К



Рисунок 2. Распространение плоской волны

Если на пути плоской волны поставить препятствие в виде щели, то начиная с некоторого расстояния L , фронт волны начнет искривляться, приобретая угловую расходимость 2Θ , вследствие чего волна будет заходить в область «геометрической тени» (рис. 3).

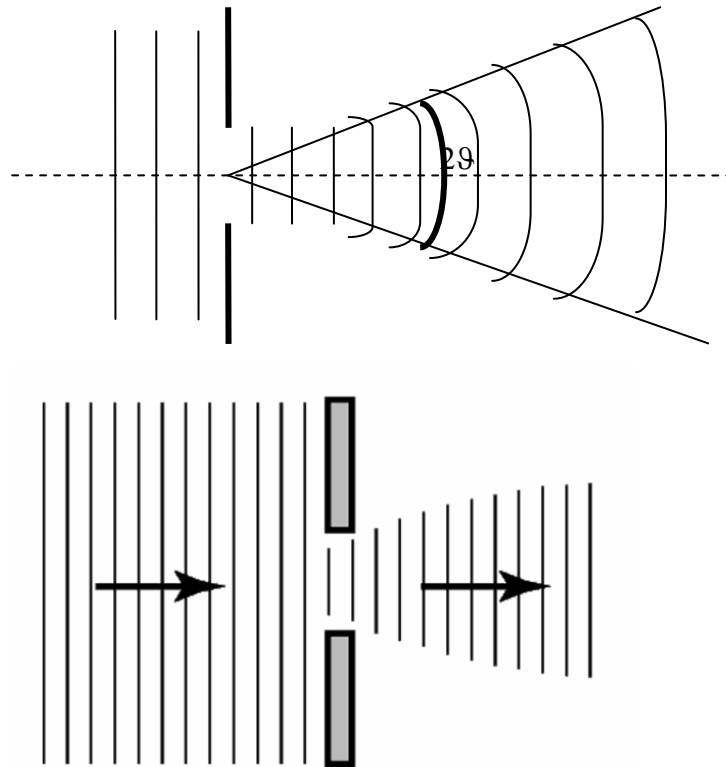


Рисунок 3. Искривление волнового фронта плоской волны через щель

При уменьшении ширины щели угловая расходимость возрастает, а расстояние L уменьшается. Это отступление от прямолинейного распространения является результатом дифракции. Дифракционная картина хорошо наблюдается, когда размер щели имеет размер порядка длины волны.

Оценить расстояние L и угол расходимости 2θ можно, используя подход, предложенный О. Френелем при объяснении дифракции световых волн. Точки фронта волны, проходящей через щель, можно рассматривать как источник "вторичных" волн. Возмущение в произвольной точке на поверхности воды является результат интерференции волн, распространяющихся от вторичных источников. При квазимонохроматическом характере колебаний частота волн после прохождения через отверстие остается неизменной, а интенсивность существенно снижается. Если точка наблюдения P лежит на оси волнового пучка, то интерферирующие волны приходят в нее в фазе и возмущение поверхности в ней будет максимальным.

Угол же расходимости 2θ принято определять положениями первых минимумов интерференции, т.к. более строгий анализ показывает, что 90% всей энергии волн на поверхности жидкости переносится в пределах именно этого угла.

Условие наблюдения первого минимума в точке Р можно записать (см. рис. 4):

$$\Delta r = \frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

Здесь Δr – разность хода волн, идущих от вторичных источников O_1 и O_2 , a – ширина щели.

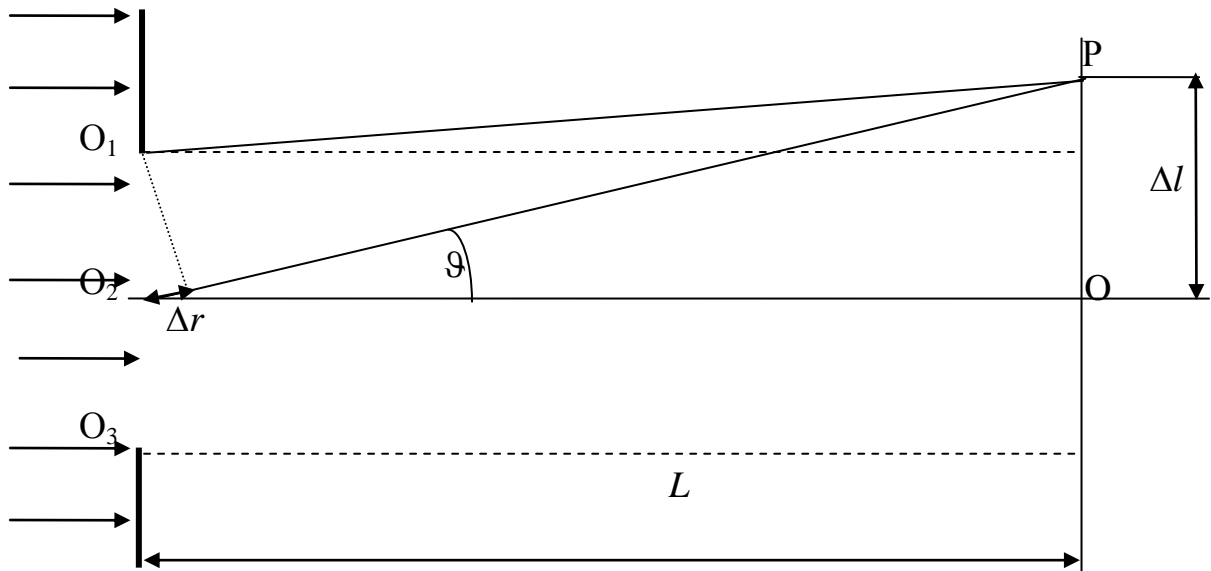


Рисунок 4. К определению угловой расходимости дифракции пучка

Из (4) можно определить:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{a} \quad (5)$$

Такую расходимость пучок приобретает на некотором характерном расстоянии L , которое называется дифракционной длиной пучка. Дифракционной длиной пучка определяет масштаб расстояний, на которых развивается заметная дифракция пучка. Расстояние L определим, используя рисунок 4.

$$\frac{\Delta r}{a/2} = \frac{\Delta l}{L} \quad (6)$$

где Δl – ширина пучка в точке Р. Обычно точку Р выбирают на расстоянии на котором поперечный размер пучка удваивается и становится равным $2a$. Тогда из (6) с учетом (4) можно записать:

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{a}{L}$$

или

$$L = \frac{a^2}{\lambda} \quad (7)$$

На пути плоской волны с длиной волны λ можно поставить не одну щель, а препятствие, состоящее из нескольких щелей (дифракционную решетку). При прохождении поверхностных волн через N отверстий решетки, расстояние между которыми сопоставимо с их размерами, также будет наблюдаться дифракционная картина. Положение максимумов интерференции от решетки будет определяться выражением:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (8)$$

где d – параметр решетки, т.е. расстояние между центрами соседних щелей, где $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$ порядок (номер) максимума, θ - угол под которым наблюдается m -ый максимум относительно центра дифракционной решетки (рис.5).

? Получите условие (8) самостоятельно.

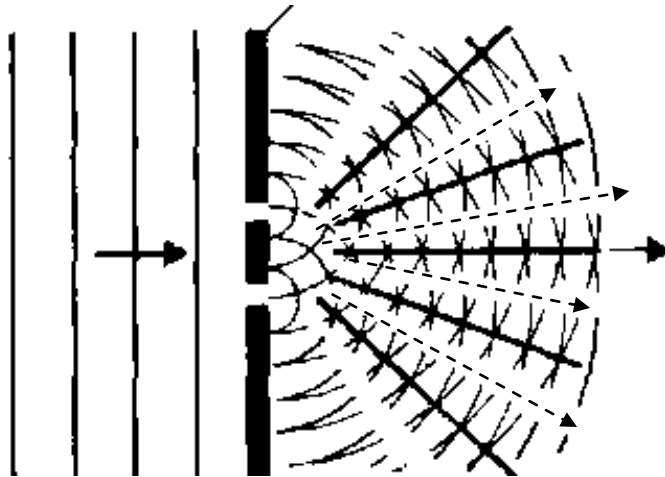


Рисунок 5. Дифракция плоских поверхностных волн на двух щелях

Линии указывают геометрическое место точек, где наблюдается максимумы m -го порядка (сплошные линии) и минимумы m -го порядка (штриховые линии со стрелками).

Описание экспериментальной установки.

Для наблюдения волн на поверхности воды, в работе используется волновая ванна со стробоскопом (рис 1). Генерация волн осуществляется путем передачи колебаний мембраны в блоке питания (рис. 2) на поверхности воды посредством изменения давления воздуха различными возбудителями волн. Частоту возбуждения можно задавать в пределах между 10 Гц и 80 Гц.

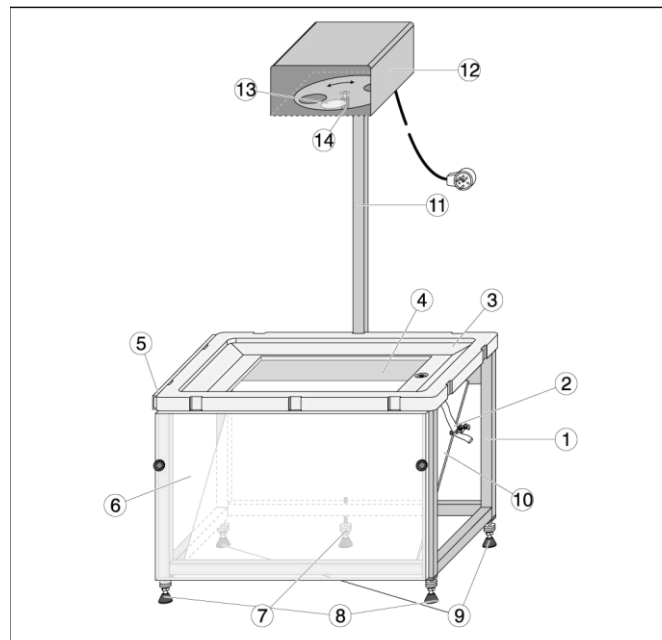


Рисунок 6. Волновая ванна со стробоскопом:

1 – Рама; 2 - Выходная трубка с шланговым зажимом; 3 – Кювета с наклоненными боковыми стенками для подавления интерференции вследствие дифракции; 4 - Стеклопластина; 5 - Направляющая для прикрепления держателей для возбудителей сферических волн; 6 - Плексигласовый экран для наблюдения; 7, 8, 9 - стабилизирующие ножки с регулировочными винтами; 10 - Отклоняющее зеркало; 11 – Штатив; 12 - Стробоскоп с галогенной лампой для освещения волновой ванны и диска стробоскопа (Диск стробоскопа можно также вращать вручную); 13 - Световая апертура с конденсорной линзой; 14 - Ручка с рифленой головкой для вращения диска стробоскопа вручную (для беспрепятственного испускания света, когда стробоскоп выключен).

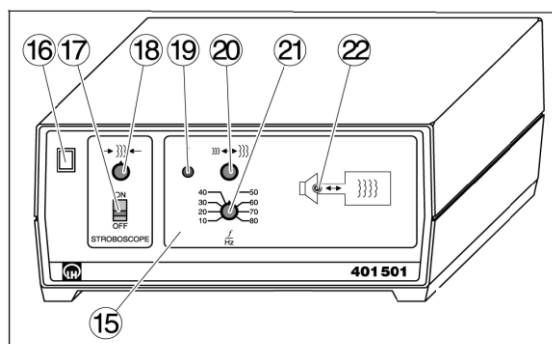


Рисунок 7. Источник питания:

15 - Источник питания с питающим кабелем; 16 - Сетевой выключатель со световым индикатором; 17 - Выключатель стробоскопа; 18 - Ручка для точной регулировки частоты стробоскопа (и для соотношения с частотой возбудителя); 19 - Кнопка для генерации одиночных волн; 20 - Ручка для регулировки амплитуды возбуждаемых волн; 21 - Ручка для регулировки частоты возбуждаемых волн (и частоты стробоскопа); 22 - Воздуховыпускные клапаны для пульсации потока воздуха для возбуждения волн посредством трубки.

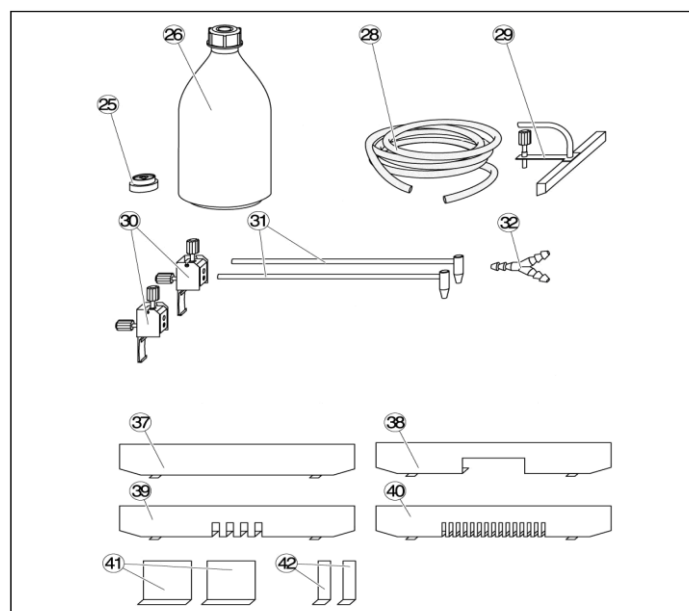


Рисунок 8. Принадлежности:

25 - Спиртовой уровень для выравнивания горизонтального положения волновой кюветы; 26 - Пластиковая бутылка с винтовой крышкой; 28 - Трубка для передачи изменения давления воздуха; 29 - Возбудитель плоских волн, ширина: 19 см; 30 - два держателя для возбудителей сферических волн, для крепления к направляющей 5; 31 - два возбудителя сферических волн; 32 - Соединитель с ниппелями Y-образной формы; для соединения трубки 28 с двумя возбудителями сферических волн. Препятствия для экспериментов по отражению и интерференции: 37 - Отражающее препятствие; 38 - Препятствие с большой щелью, ширина щели: 71 мм.; 39 - Препятствие с 4 одиночными щелями, ширина щели: 7 мм, расстояние между щелями: 14 мм.; 40 - Препятствие с 15 одиночными щелями, ширина щели: 4 мм, расстояние между щелями: 8 мм.; 41 - 2 покровных слайда, ширина: 55 мм.; 42 - 2 покровных слайда, ширина: 12 мм.

Подготовка экспериментальной установки

- Установите спиртовой уровень 25 на стеклянную пластину 4 и выровняйте волновую кювету в горизонтальном направлении с помощью двух нивелирующих ножек 8. Ножка 7 остается неподвижной. Во время выравнивания две стабилизирующие ножки 9 могут не касаться лабораторного стола; после выравнивания осторожно вывинтите их до соприкосновения с поверхностью стола, не меняя при этом горизонтальное положение кюветы.
- Закройте выходную трубку 2 с шланговым зажимом.
- Наполните волновую кювету водой. Уровень воды: около 5 мм
- Соедините передаточную трубку 28 к воздуховыпускным клапанам 22.
- Подсоедините кабель стробоскопа 12 к разъему 24. Включите источник питания, нажав сетевой выключатель 16. При необходимости уберите диск стробоскопа с пути луча с помощью ручки 14.

Возбуждение волн

- Важно! Для каждого эксперимента необходимо точно настраивать глубину погружения возбуждителя/лей в воду, частоту и амплитуду колебаний. Часто картину наблюдаемых явлений можно значительно улучшить, изменяя эти параметры. При изменении частоты возбуждения часто приходится менять и амплитуду. Изменение амплитуды позволяет фокусировать различные зоны волновой картины (необходимо учитывать в опытах по дифракции и отражению).

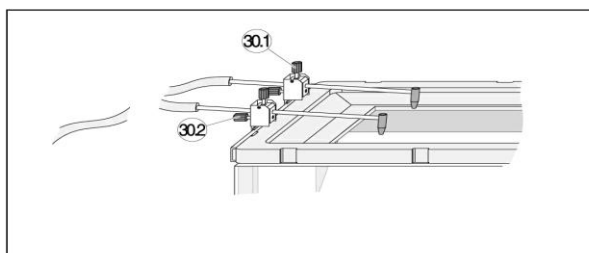
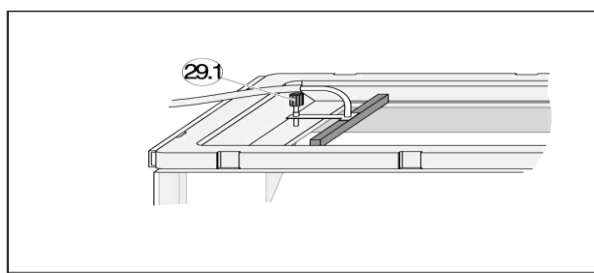


Рисунок 9. Возбуждение плоских волн. Рисунок 10. Возбуждение круговых волн.

- Подготовка: плоские волны. Соедините передаточную трубку 28 с переходником возбуждителя плоских волн 29 и установите возбуждитель в волновой кювете. Установите винт (29.1) таким образом, чтобы нижний край возбуждителя слегка касался поверхности воды (см. рис. 9).
- Подготовка: сферические волны. Прикрепите держатель 30 к направляющей 5 и закрепите возбуждитель круговых волн 31 с помощью винта (30.1). Затем подсоедините передаточную трубку 28. Для двойного возбуждения используйте Y-образный соединитель и два коротких кусочка трубки. Установите винт (30.2) таким образом, чтобы нижний край возбуждителя слегка касался поверхности воды (см. рис.10).

- Генерация волн. Установите желаемую амплитуду и частоту с помощью ручек 20 и 21. При необходимости отрегулируйте возбудитель плоских волн с помощью винта (29.1) или возбудитель круговых волн с помощью винта (30.2) до момента достижения четкого изображения волн.
- Использование стробоскопа. Замечание: в области низких частот волны можно наблюдать и без стробоскопа. При более высоких частотах возбуждения рекомендуется использование стробоскопа. Принцип действия устройства основан на освещении прерывистым освещением волновой картины на поверхности воды. Частота прерываний светового потока должна совпадать с частотой поверхностной волны. Модулированное освещение создает стробоскопический эффект, что позволяет фиксировать какую-либо выбранную фазу колебаний, т.е. как бы "останавливает" для наблюдения бегущую волну и на экране наблюдается стоячая картина волны, по которой и производятся измерения. Включите стробоскоп с помощью выключателя 17. После небольшого времени разогрева (несколько секунд), на экране появится изображение стоячей волны или медленно движущейся волны. При необходимости поверните ручку 18 для тонкой настройки синхронизации возбудителя и частоты стробоскопа. После выключения стробоскопа, возможно, придется повернуть диск прибора с помощью винта 14, чтобы он не заграждал путь луча.

? *Чем задается частота волн на поверхности воды? Можно ли использовать приближение "мелкой воды" при заданном уровне воды в ванне?*

Описание эксперимента.

1. Исследование интерференции круговых волн.
 - Соберите установку для наблюдения круговых волн. Получите и сфотографируйте круговые волны при нескольких частотах источника и измерьте длины волн, соответствующие этим частотам.
Замечание: Для определения реального значения длины волны λ_p необходимо учитывать множитель $\beta=1.65$, так как поверхностные волны проецируются на экран. Реальную длину волны можно рассчитать на основе измеренной длины волны λ как $\lambda_p = \lambda / \beta$.
 - Получите и сфотографируйте интерференционную картину от двух точечных источников, используя два возбудителя круговых волн 31. Измерьте углы интерференции и сравните с теоретически рассчитанными по формуле (3).
 - Исследуйте интерференционную картину в зависимости от расстояния между источниками. Объясните полученные результаты.

2. Исследование линейных волн.

- Поставьте на волновую ванну возбудитель плоских волн 29.
- Получите и сфотографируйте линейные волны при нескольких частотах источника.
- Постройте график зависимости $\lambda(1/\nu)$. Определите скорость распространения волны. Сравните значения со значениями скорости для круговой волны.

Замечание: Для определения реального значения длины волны λ_p необходимо учитывать множитель $\beta=1.65$, так как поверхностные волны проектируются на экран. Реальную длину волны можно рассчитать на основе измеренной длины волны λ как $\lambda_p = \lambda / \beta$.

3. Исследование дифракции линейных волн.

- Получите и сфотографируйте дифракционные картины линейных волн на щелях различной ширины.
- Исследуйте зависимость (7) дифракционной длиной пучка от длины волны λ . Объясните полученные результаты.
- Подберите частоту источника, которую необходимо задать для наблюдения дифракции на решетках 39 и 40. Для расчетов используйте полученное значение скорости волны. Получите и сфотографируйте дифракционные картины линейных волн на дифракционных решетках.

Литература:

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика. М.: Наука, 1979. с
2. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975. с.
3. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики. Том 2. Колебания и волны. Квантовая физика. М.: Наука, 1981. с.
4. Крауфорд Ф. Волны под ред. А.И.Шальникова и А.О.Вайсенберга. М.: Наука, 1984. с.
5. http://physics.nad.ru/Physics/Cyrillic/int_txt.htm
6. <http://www.himikatus.ru/art/ch-act/0148.php>
7. Лайтхилл Дж. Волны на поверхности жидкости. Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 598с.

Ольга Васильевна **Белова**, Екатерина Владимировна **Зайцева**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛН
НА ПОВЕРХНОСТИ ЖИДКОСТИ**

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.