533 1

НОВЫЕ ОПЫТЫ ПО СЛОЖЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ И МЕХАНИЧЕСКОМУ РЕЗОНАНСУ

Предлагаемая демонстрационная установка обладает известной степенью универсальности и позволяет осуществить демонстрацию опытов по сложению механических колебаний. К их числу можно отнести опыты по сложению взаимно перпендикулярных колебаний при регулируемых в широком интервале частотных и фазовых соотношениях (фигуры Лиссажу), опыты по сложению колебаний одного направления (интерференция при различных сдвигах фаз, биения при желаемой разности частот, сложения колебаний с кратными частотами).

Наряду с этими, ставшими классическими, опытами установка позволяет продемонстрировать явление механического резонанса. Известен ряд способов демонстрации резонансных эффектов в механике. Однако эти способы, как правило, не позволяют вскрыть фазовые соотношения при резонансе, в то время как именно фазовая сторона явления, наряду с амплитудным эффектом, в предлагаемой демонстрации подчеркивается с особой отчетливостью.

Установка дает возможность показать также некоторые особенности колебаний струны, например зависимость спектрального состава колебаний от натяжения и условий возбуждения струны.

В принципиальном отношении представляет интерес возможность использования установки для демонстрации картины сложения не только двух, но и большего числа колебаний, например трех.

Основным достоинством схемы, действующей по принципу оптического осциллографа, является ее светосильность. Это обстоятельство дает возможность получить картину крупных размеров, имеющую достаточную освещенность и хорошо видимую на большом экране в самой большой аудитории.

1. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Оптическая схема установки изображена на рис. 1. Проектируемым объектом является ярко освещенное круглое отверстие S в малом экранчике A, скрепленном со струной. Тонкая линза L_1, жестко связанная с ножкой электрокамертона, создает изображение S в виде светлого пятна S' на экране наблюдения B (рис. 1—2).

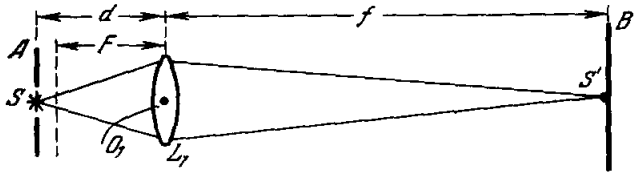

Рис. 1.

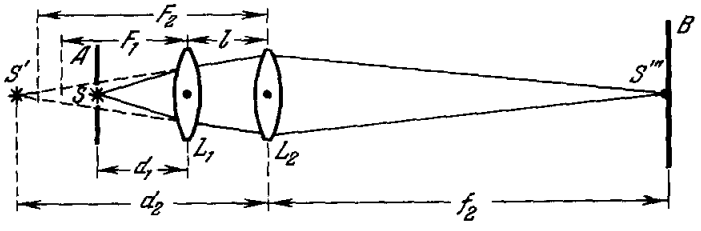

Рис. 2.

Из геометрических соображений очевидно, что если струна и вместе с ней экранчик A совершают колебательное движение, аналогичные колебания, но увеличенные по амплитуде и сдвинутые по фазе на π, будет совершать и пятно S'. Амплитуда колебаний S' возрастает по сравнению с амплитудой колебаний отверстия S в $k_1 = f/d$ раз. При колебательном движении линзы L_1 пятно S' будет совершать колебания, совпадающие с колебаниями центра линзы (точка O_1) по направлению и по фазе, при коэффициенте увеличения по амплитуде $k_2 = (f + d)/d = k_1 + 1$.

При одновременных колебаниях и струны и линзы светлое пятно S' будет совершать сложное колебательное движение, представляющее собой векторную сумму двух

колебаний, при дополнительном сдвиге фаз π и близких коэффициентах усиления по амплитуде k_1 и $k_2 = k_1 + 1$ $(k_1 \gg 1)$.

Если использовать второй электрокамертон с закрепленной на нем линзой L_2 подходящей оптической силы $(F_2 > F_1)$, имеющий другую частоту собственных колебаний ν_2 (например, $\nu_2 = 2\nu$), и расположить приборы по схеме рис. 2, можно практически без уменьшения светосильности расположения осуществить сложение трех колебаний. Коэффициенты усиления по амплитуде в этом случае будут зависеть от фокусных расстояний линз L_1 и L_2 и их расположения.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Одним из двух источников колебаний служит струна с плавно регулируемым натяжением, работающая на основной частоте в режиме автоколебаний.

Струна, изготовленная из железной проволоки диаметром 0,5 *мм* и имеющая длину около 100 *см*, установлена на деревянной скамье (100 × 30 × 1,5 *см*), поддерживаемой четырьмя ножками с толстыми амортизирующими резиновыми набойками.

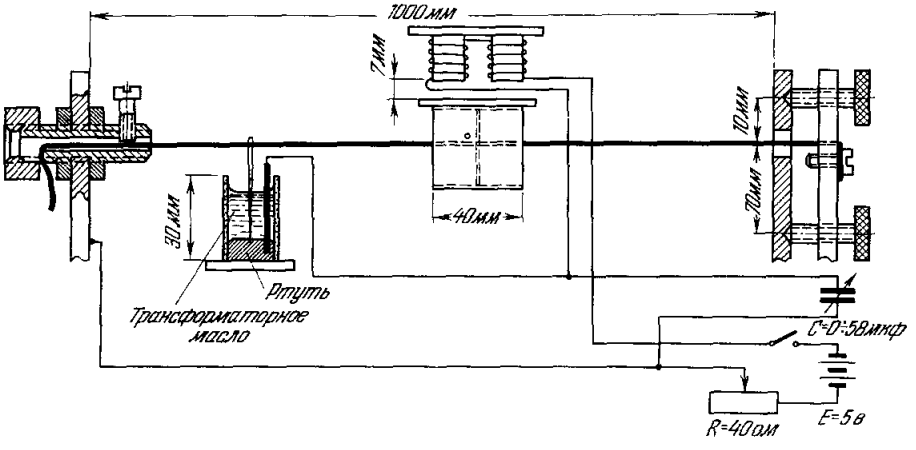

Рис. 3.

Закрепление струны на скамье предусматривает возможность плавной регулировки ее натяжения, а также в случае необходимости — поворота струны относительно ее длины.

С середины струны скреплен небольшой непрозрачный экранчик A на легком каркасе, изготовленном из трех швейных иголок и напоминающем по своему виду опрокинутую на бок букву П. Этот каркас припаян средней своей частью к струне

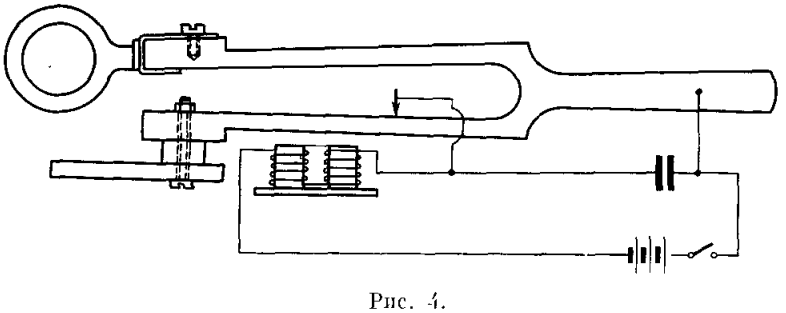

Рис. 4.

так, чтобы плоскость каркаса оказалась вертикальной. Экраном служит подклеенный к каркасу квадратный листок черной оберточной бумаги (4 × 4 *см*), окрашенный со стороны, обращенной к источнику света, алюминиевой краской. Вблизи средней части экрана A имеется небольшое круглое отверстие S диаметром 0,5—1 *мм*. К верхней части экрана подклеена горизонтальная полоска жести, выполняющая роль якорька электромагнита. Общий вес каркаса с экраном и якорьком составляет около 1,6 *г*.

Возбуждение автоколебаний струны осуществляется при помощи небольшого съемного электромагнита и ртутного прерывателя.

Схема цепи возбуждения струны с указанием некоторых параметров цепи и данных по расположению приборов в установке приведена на рис. 3.

Вторым источником колебаний является уравновешенный электрокамертон с закрепленной на одной из его ножек линзой L_1 ($F = 7$ *см*, $D = 3{,}5$ *см*) с относительным отверстием $D : F = 1 : 2$, работающий на постоянной частоте $\nu_0 \cong 51$ *гц*. Схема цепи возбуждения электрокамертона приведена на рис. 4.

3. ДЕМОНСТРАЦИЯ ОПЫТОВ

Осветитель с конденсором и объективом приближается к скамье со струной, и изображение нити его лампы (в наших опытах использовалась 300-*вт* кинопроекционная лампа на 110 *в*) проектируется на плоскость экранчика в области круглого отверстия S.

Для успешного и быстрого выполнения всей серии опытов можно рекомендовать соблюдение следующих двух условий.

Перед началом серии опытов целесообразно установить новую иглу в ртутном прерывателе возбуждения струны, а стаканчик прерывателя заполнить слоем ртути, залитой сверху чистым трансформаторным маслом.

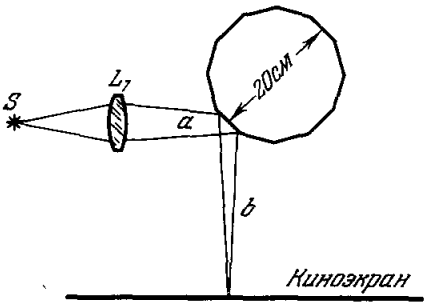

Рис. 5.

Для устранения взаимосвязи колебаний (если таковая возникает) следует уменьшить передачу энергии колебаний демонстрационному столу, подложив дополнительные амортизирующие прокладки под ножки скамьи и под основание штатива электрокамертона.

Опыт I. **Сложение колебаний одного направления.** *Электрокамертон с линзой* закрепляется в штативе. Схема опыта приведена на рис. 5.

Если колебания струны и электрокамертона происходят порознь, то световой пучок, отраженный от вращающегося зеркала, описывает на экране временную развертку соответствующего колебания. При одновременных колебаниях струны и линзы на киноэкране наблюдается временна́я развертка суммарного колебания.

Опыты целесообразно выполнять при равенстве амплитуд обоих колебаний.

Интерес представляют следующие демонстрации: а) сложение колебаний одинаковой частоты при медленном, монотонном изменении сдвига фаз; б) сложение

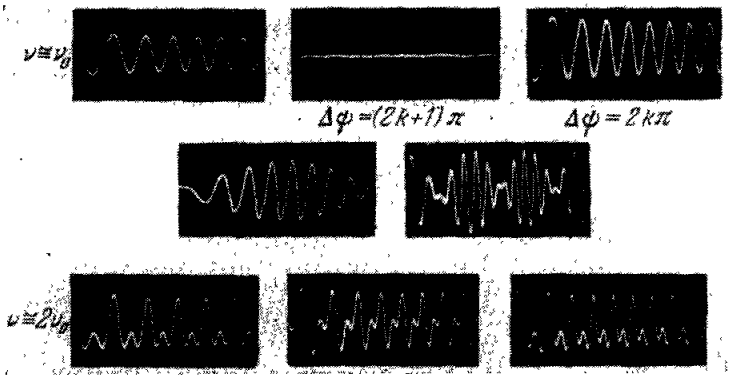

Рис. 6. При $a + b \cong 2$ *м* амплитуда результирующего колебания составляет 0,5 *м* (картина получена при диаметре отверстия S около 0,4 *мм*).

колебаний при малом различии частот (биения); в) сложение колебаний при кратном соотношении частот $\nu : \nu_0 = 2 : 1$.

На рис. 6 приведены фотографии соответствующих картин, полученных на киноэкране при суммарном удалении его от установки в два метра.

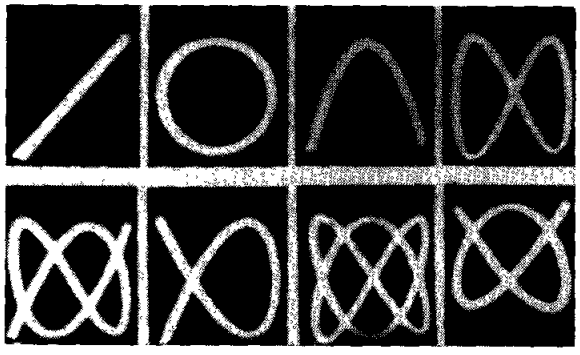

Рис. 7. $f \simeq 4$ *м*; диаметр отверстия S около 1 *мм*; аудитория затемнена (экспозиция при фотографировании $t \cong 1$ *сек*).

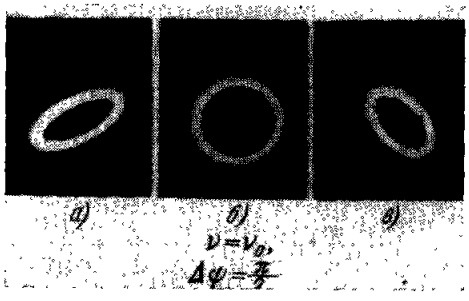

Рис. 8. $f \cong 3$ *м*; диаметр отверстия S около 1 *мм*.

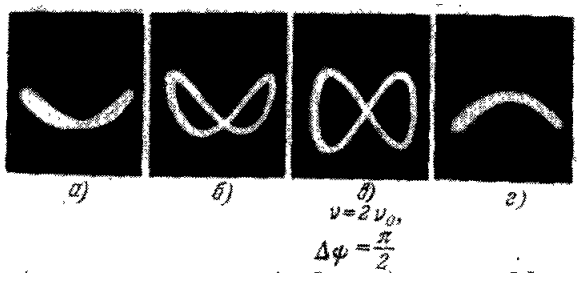

Рис. 9. $f \cong 3$ *м*; диаметр отверстия около 1 *мм*.

Рис. 10. Диаметр отверстия S около 0,4 *мм*.

Опыт II. **Сложение взаимно перпендикулярных колебаний.** Схема опыта приведена на рис. 1. При одновременных колебаниях струны и камертона пятно S' описывает фигуру сложного вида. Изменяя натяжение струны, можно легко добиться нужного соотношения частот (1 : 1; 4 : 3; 3 : 2; 5 : 3; 2 : 1 и т. д.) и получить соответствующую фигуру Лиссажу. Интересно сделать полученную фигуру неподвижной при желаемой разности фаз колебаний. Этого с успехом можно добиться при помощи винта плавной регулировки натяжения струны.

Фигуры Лиссажу рис. 6 получены на экране B (0,8 × 0,8 *м*), удаленном от установки на 4 *м*, при затемнении аудитории.

Опыт III. **Резонансный эффект на частотах $\nu = \nu_0$ и $\nu = 2\nu_0$. Амплитудные и фазовые соотношения при резонансе.** Для большей убедительности демонстрации электромагнит и стаканчик ртутного прерывателя следует снять со скамьи. Электрокамертон закрепляется на специальном штативе подходящей высоты с тремя ножками в основании. Штатив устанавливается непосредственно на скамье со струной. Для получения наибольшего эффекта желательно, чтобы одна из ножек основания штатива опиралась на поверхность скамьи под струной вблизи ее середины, а две другие лежали на прямой, параллельной струне.

На частоте $\nu = \nu_0 = 51$ *гц* колебания струны характеризуются малым затуханием, и резонансная амплитуда оказывается излишне большой при неустойчивом состоянии резонирующей системы. Поэтому при получении резонанса на частоте $\nu = \nu_0$ целесообразно существенно уменьшить амплитуду колебаний камертона и вместе с тем ослабить взаимосвязь камертона со струной. Нужного эффекта можно добиться, подложив под две ножки основания штатива подходящие резиновые прокладки, а под третью ножку, расположенную под струной,— деревянный брусочек той же толщины. Приближение к резонансной частоте должно производиться достаточно медленно, последовательными незначительными изменениями натяжения струны. При соблюдении указанных деталей и предосторожностей легко удается получить устойчивый и отчетливо выраженный резонансный эффект.

Фотографии на рис. 8, *а*, *б*, *в* ($f = 3$ *м*) показывают изменение амплитудных и фазовых соотношений при приближении к частоте $\nu = \nu_0$. Картина на рис. 8, *б* ($\nu = \nu_0$) вскрывает закономерности резонанса: амплитуда вынужденных колебаний струны максимальна, сдвиг фаз равен $\pi/2$.

Не менее успешно можно наблюдать резонансный эффект на частоте $\nu = 2\nu_0$. В связи с бо́льшим затуханием резонирующей системы на этой частоте резонансная кривая оказывается не такой острой, что позволяет получить устойчивую картину эффекта при приближении к резонансной частоте и при переходе через нее без предосторожностей, необходимых в предыдущем опыте. При демонстрации этого случая резонанса подкладку из-под ножек основания штатива следует убрать, а амплитуду колебаний камертона сделать достаточно большой.

Картины, приведенные на рис. 9, *а—г*, убедительно иллюстрируют амплитудные и фазовые соотношения резонансного эффекта на частоте $\nu = 2\nu_0$.

Опыт IV. **Зависимость спектрального состава колебаний струны от условий ее возбуждения.** Этот опыт целесообразно показать непосредственно за опытом по наблюдению резонанса на частоте $\nu = \nu_0$, ничего не изменяя в расположении приборов и настройке струны. Остановив рукой резонансные колебания струны, следует затем возбудить их снова, оттянув струну в каком-либо месте. При возбуждении струны в точке, близкой к точке закрепления, можно (при диаметре отверстия S порядка 0,5 *мм*) отчетливо видеть, что на основное колебание струны ($\nu = \nu_0$) накладываются гармоники высших порядков. Фотографии соответствующих картин приведены на рис. 10.

Я. Е. Амстиславский, А. С. Мамаков