

ЛЕКЦИОННЫЕ  
ДЕМОНСТРАЦИИ  
ПО ФИЗИКЕ

выпуск 7

*М.А.Грабовский*

КОЛЕБАНИЯ  
и  
ВОЛНЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1952

# ЛЕКЦИОННЫЕ ДЕМОНСТРАЦИИ ПО ФИЗИКЕ

Под редакцией А. Б. МЛОДЗЕЕВСКОГО

ВЫПУСК 7

*М. А. Грабовский*

КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1952

## АННОТАЦИЯ

Книга содержит описание лекционных демонстраций по разделам «Механические колебания» и «Звук» общего курса физики, читаемого в вузе. Основная часть этих демонстраций ставится в Московском университете.

Книга предназначена для преподавателей и работников физических кабинетов высших учебных заведений и может быть полезна преподавателям физики в средней школе.

Редакторы *В. А. Григорова и Е. Б. Кузнецова.*

Техн. редактор *Н. А. Тумаркина.*

Корректор *А. С. Бакулова.*

Подписано к печати 5/XI 1952 г. Бумага 84 × 108/32. 3,6 бум. л. 11,89 печ. л. 11,18 уч.-изд. л. 37 600 тип. зн. в печ. л. Тираж 15 000 экз. Т08932. Цена книги 3 р. 35 к. Номинал по прейскуранту 1952 г. Заказ № 3818.

---

Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова Главполиграфиздата при Совете Министров СССР. Москва, Валовая, 28.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	9
-----------------------	---

### I. Элементарные опыты по колебаниям

1. Вертикальные колебания груза на спиральной пружине	11
2. Крутильные колебания . . . . .	13
3. Сравнение продольных и крутильных колебаний . . . . .	15
4. Физический маятник . . . . .	16
5. Центр качания . . . . .	18
6. Колебания зажатой в тиски пружины . . . . .	20
7. Колебания столба жидкости в сообщающихся сосудах . . . . .	21
8. Влияние сопротивления среды на затухание колебаний маятника . . . . .	22
9. Колебания медной пластины в магнитном поле . . . . .	23
10. Колебания магнитной стрелки в магнитном поле . . . . .	25
11. Колебания ферромагнитного стержня или шарика в магнитном поле . . . . .	25
12. Гармонические колебания . . . . .	25

### II. Запись колебаний

13. Маятник с песком . . . . .	29
14. Запись колебаний на закопченной стеклянной пластинке	30
15. Запись колебаний электрокамертона на экране . . . . .	32
16. График сильно затухающих колебаний . . . . .	35
17. Наблюдение колебаний электронного пучка . . . . .	36
18. Запись электрических колебаний на плейфовом осциллографе . . . . .	42

### III. Автоколебания

19. Незатухающие колебания цилиндрической спиральной пружины . . . . .	46
20. Спираль с током . . . . .	49

21. Колебания «сброса» . . . . .	50
Релаксационные колебания уровня воды в сосуде (50). Релаксационные колебания маятника (52).	
22. Возбуждение пятивтугой резины равномерным потоком воздуха . . . . .	53
23. Термомеханические автоколебательные системы . . . . .	54
Звучащая нагретая пластина (55). Опыт А. С. Попова (56).	
24. Термоакустические колебания . . . . .	57
Опыт с газовой горелкой (57). Опыт с нагретой сеткой (58).	
25. Термомеханическая модель незатухающих колебаний . .	59
<b>IV. Вынужденные колебания</b>	
26. Вынужденные колебания маятников . . . . .	62
27. Колебания фундамента двигателя . . . . .	62
28. Гироскоп с резонаторами . . . . .	64
29. Вращательный маятник . . . . .	65
30. Вынужденные колебания цилиндрической пружины с грузом . . . . .	69
31. Качающиеся часы . . . . .	70
32. Частотомеры . . . . .	71
Демонстрационный частотомер (71). Технический частотомер (72).	
33. Вынужденные колебания струны. . . . .	76
Первый вариант опыта (76). Второй вариант опыта (78).	
<b>V. Параметрический резонанс</b>	
34. Параметрическое возбуждение простого маятника . . .	81
Первый вариант опыта (81). Второй вариант опыта (82).	
35. Параметрическое возбуждение струны под действием протекающего по ней переменного тока . . . . .	83
36. Маятник-качели . . . . .	84
<b>VI. Сложение колебаний, направленных по одной прямой</b>	
37. Механическая модель сложения колебаний, направленных по одной прямой . . . . .	86

## ОГЛАВЛЕНИЕ

5

38. Сложение двух колебаний, направленных по одной прямой, наблюдаемое с помощью двух электрокамертонов . . . . .	88
39. Сложение двух колебаний, направленных по одной прямой, наблюдаемое на электронном осциллографе . . . . .	90

## VII. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний

40. Опыт с шаром, подвешенным на бечевке . . . . .	91
41. Запись взаимно перпендикулярных колебаний на маятнике с песком . . . . .	92
42. Проектирование взаимно перпендикулярных колебаний на экран с помощью двух освещенных щелей . . . . .	93
43. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний, наблюдаемое с помощью двух электрокамертонов . . . . .	95
44. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний на электронном осциллографе. . . . .	96

## VIII. Колебания связанных систем

45. Колебания двух физических маятников . . . . .	101
46. Маятник, подвешенный к маятнику (двойной маятник)	104
47. Переход одного вида колебаний в другой . . . . .	105
Переход продольных колебаний в простые и обратно (105). Переход продольных колебаний в крутильные и обратно (105).	
48. Вынужденные колебания связанных систем . . . . .	106
49. Опыт, иллюстрирующий использование вынужденных колебаний для уменьшения качки корабля . . . . .	108

## IX. Волны

50. Механические модели, демонстрирующие возникновение поперечных и продольных волн . . . . .	111
51. Волны на резиновой трубке . . . . .	115
52. Волны на поверхности воды . . . . .	116
53. Прибор Богословского для демонстрации капиллярных волн на поверхности жидкости . . . . .	122
54. Прибор для демонстрации продольных волн . . . . .	129

**X. Источники звука**

55. Звучание зажатой пластины . . . . .	132
56. Камертон . . . . .	132
Наблюдения за колебаниями ветвей камертона (132).	
Роль резонаторного ящика (134). Резонирование воздушного столба на колебания камертона (134). Интерференция звуковых волн, получаемых камертоном (136).	
57. Звуки, возникающие при периодических толчках воздуха (дисковая сирена) . . . . .	137
58. Ламповый генератор звуковой частоты . . . . .	140
59. Звучащая дуга Петрова . . . . .	141

**XI. Распространение звука**

60. Пондеромоторное действие звуковых волн . . . . .	143
61. Прибор для демонстрации скорости распространения воздушного импульса в металлической трубе (прибор Н. А. Умова) . . . . .	146
62. Определение скорости звука с помощью электронного осциллографа . . . . .	148
Первый способ (148). Второй способ (152).	
63. Возрастание скорости звука в воздухе при повышении температуры . . . . .	153
64. Скорость звука в различных газах . . . . .	156
65. Звукопроводность твердых и жидких тел . . . . .	158

**XII. Измерение силы звука и его анализ**

66. Измерение силы звука . . . . .	160
67. Тембр звука . . . . .	163
68. Высота звука . . . . .	165
69. Демонстрационный прибор для анализа звуковых колебаний, сконструированный П. Н. Лебедевым . . . . .	168
70. Анализ звуковых колебаний на электронном осциллографе	171

**XIII. Опыты по резонансу, интерференции звуковых волн и некоторые другие**

71. Наблюдение резонанса на камертонах . . . . .	172
72. Интерференция звуковых волн . . . . .	174

73. Биения . . . . .	175
74. Акустическое захватывание . . . . .	179
75. Явление Допплера . . . . .	180
Опыт с движением звучащего камертона (180). Опыт с колебаниями звучащего репродуктора (180). Опыт с вращением органной трубы (181).	
76. Модуляция звуковой волны . . . . .	183

#### XIV. Стоячие волны в трубах, стержнях, пластинах

77. Стоячая звуковая волна в трубе . . . . .	186
78. Влияние затухания системы на остроту настройки (резонансная дека) . . . . .	189
79. Поперечные колебания стержней . . . . .	191
80. Продольные колебания стержней . . . . .	192
81. Возбуждение продольных колебаний стержня с помощью бесконечного смычка . . . . .	194
82. Звучащие пластиинки . . . . .	195

#### XV. Пьезоакустика

83. Прямой пьезоэффект . . . . .	199
84. Обратный пьезоэффект . . . . .	201
85. Пьезозвонок . . . . .	202
86. Пьезотелефон и пьезомикрофон . . . . .	204
87. Пьезотекстура . . . . .	206
Прямой пьезоэффект с текстурой пластиной (208). Обратный пьезоэффект с текстурой пластиной (210). Камертон с нанесенным слоем сегнетовой соли (213).	

#### XVI. Ультразвук

88. Ультразвуковые колебания кварца . . . . .	214
Фонтан в жидкости под действием ультразвуковых колебаний кварца (216). Получение эмульсий с помощью ультразвука (218). Химическое действие ультразвуко-	

вых волн (221). Дифракция света на ультразвуковых волнах в жидкости (221).	
89. Магнитострикционные колебания . . . . .	224
Магнитострикция никелевой проволоки в постоянном магнитном поле (225). Магнитострикционный генератор звуковых и ультразвуковых колебаний (228).	
Литература . . . . .	232

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая вниманию читателей книга представляет собой сборник лекционных демонстраций по разделам «Механические колебания» и «Звук». Подобно предыдущим выпускам серии «Лекционные демонстрации по физике» этот сборник в основном содержит опыты, иллюстрирующие отдельные разделы курса физики, читаемого в вузе. В этой книге, как и в прошлых выпусках, мы в первую очередь отражаем опыт демонстрационной техники, накопившийся в физическом кабинете МГУ за долгие годы его существования. В сборник включены, кроме того, новые демонстрации, которые удалось поставить в процессе работы над книгой.

При постановке новых опытов или модернизации старых физический кабинет МГУ в меру своих технических возможностей стремился использовать новые методы, которыми в настоящее время пользуется электроакустика. Это в известной мере нашло свое отражение в настоящем сборнике. При обсуждении отдельных демонстраций мы стремились рассмотреть те варианты опытов, которые можно поставить, пользуясь ламповыми усилителями, ламповым звуковым генератором, электронным осциллографом и т. д. Особенно мы считали необходимым внедрить в практику физического кабинета электронный осциллограф, который значительно расширяет возможности демонстрационного эксперимента. Настоящий сборник следует рассматривать как первый наш опыт в этом направлении.

Описания отдельных демонстраций расположены в сборнике по тематическим главам. Рассмотрению каждого опыта предшествует краткое пояснение демонстрируемого

физического явления. В тех случаях, когда описываются новые или мало известные демонстрации, пояснительная часть к описанию дается несколько подробнее.

Ограниченный объем книги лишил нас возможности включить в сборник описание некоторых старых опытов. По той же причине в сборник не вошел ряд вопросов, относящихся к технике звукозаписи и др.

При постановке новых демонстраций и при обсуждении опытов, поставленных ранее в физическом кабинете, я пользовался советами своих товарищей по работе — Колбанова М. В., который в течение долгого периода времени заведывал физическим кабинетом МГУ, Усагина С. И. и Егорова В. С. Пользуюсь случаем поблагодарить их за это.

Проф. А. Б. Младзеевскому, редактору издания «Лекционные демонстрации по физике», приношу свою благодарность за ценные замечания, сделанные им при ознакомлении с рукописью книги.

*М. Грабовский*

# I. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ОПЫТЫ ПО КОЛЕБАНИЯМ

## 1. Вертикальные колебания груза на спиральной пружине

Небольшой груз подвешивается у нижнего конца довольно жесткой спиральной пружины. Верхний конец пружины закрепляется в горизонтальном держателе массивного штатива (рис. 1). Оттянув груз на несколько сантиметров вниз и затем отпустив его, демонстрируем свободные колебания системы пружина — груз. Желательно подобрать пружину такой жесткости и груз такой массы, чтобы период колебаний был не меньше 0,5—1 сек.

С помощью метронома или демонстрационного секундомера определяем частоту колебаний, затем груз увеличиваем в 2—3 раза и демонстрируем увеличение периода колебаний.

Далее спиральную пружину заменяем новой пружиной, с другими упругими свойствами. Нагрузив ее тем же грузом, демонстрируем изменение периода колебаний системы вследствие изменения коэффициента упругости пружины. Вторую пружину необходимо подобрать такой жесткости, чтобы периоды колебаний значительно отличались друг от друга: аудитория должна сразу, без подсчета, заметить изменение периода колебаний. Рекомендуется попутно количественно оценить коэффициенты упругости первой и второй пружин при статических нагрузках.

*Практические указания.* 1) Жесткость спиральной пружины зависит от ряда величин: от диаметра и упругих свойств проволоки, из которой изготовлена пружина, от диаметра и числа витков пружины и от технологии изготовления пружины. Поэтому получить колебания

данного груза с нужным периодом можно с помощью различных пружин. Исходя из этого, мы при описании той или иной демонстрации будем указывать лишь приблизительные размеры пружины, ссылаясь, в целях

некоторой ориентировки читателя, на размеры пружин, употребляемых в физическом кабинете Московского университета. Так, например, в данном случае была взята пружина, навитая из стальной проволоки диаметром 2—3 мм; на длине 200 мм пружины укладывалось 35 витков, диаметр витка 60 мм. Такая пружина при грузе 1 кГ должна колебаться с периодом примерно 0,6 сек.

2) Оба конца пружины снабжены крючками: верхний крючок используется для прикрепления пружины к горизонтальному держателю штатива, нижний — к платформе для подвешивания гирь. В подобных опытах удобно брать плоские цилиндрические гири с разрезом вдоль радиуса (рис. 1).

3) Штатив снабжается передвижной шкалой с делениями (рис. 1). На фоне

этой шкалы движется легкая стрелка, прикрепленная к нижнему концу спирали. При наличии такой шкалы можно оценить в процессе демонстрации коэффициент упругости пружины.

4) Цилиндрические спиральные пружины изготавливаются на токарном станке. Проволока наматывается на дерев-

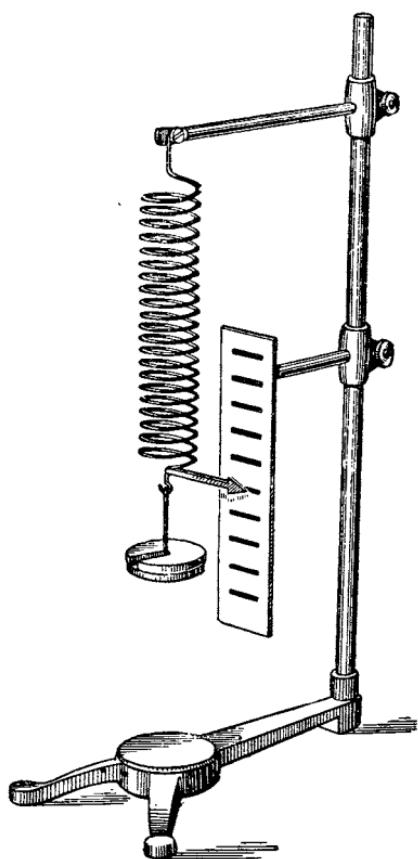


Рис. 1.

вянную оправу, закрепленную в патроне станка. При этой операции проволока все время с постоянным усилием оттягивается. Это удобно сделать, пропуская проволоку между двумя деревянными планками, слегка зажатыми в слесарных тисках. На жесткость изготавляемой пружины влияет величина этого натяжения.

## 2. Крутильные колебания

Стальная проволока одним концом укрепляется на горизонтальном держателе высокого массивного штатива, другим концом соединяется с деревянной рейкой (рис. 2). На рейке нанесены деления (небольшие углубления по поверхности). С помощью металлических скоб, расположенных на равном расстоянии от проволоки, нагружаем рейку двумя одинаковыми грузами. Отклонив рейку на небольшой угол, демонстрируем свободные колебания крутильного маятника.

Для установления зависимости периода колебаний маятника от момента инерции системы поступаем следующим образом: сначала демонстрируем колебания системы при расположении грузов на концах рейки и оцениваем с помощью метронома период колебаний; затем момент инерции системы уменьшаем, приближая на равные расстояния

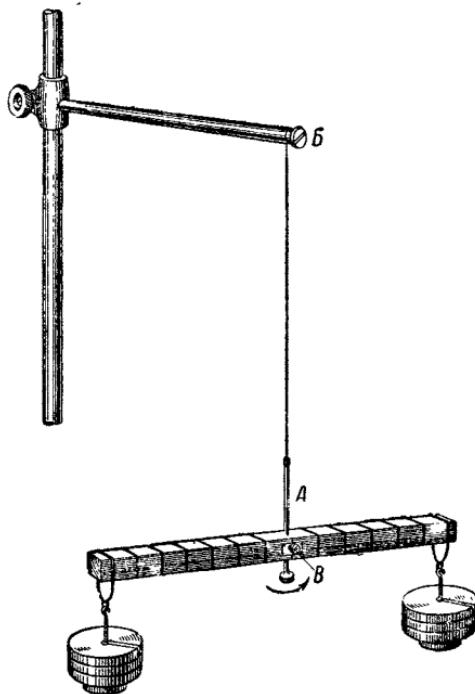


Рис. 2.

к оси маятника оба груза или уменьшая в равной степени величины грузов, расположенных на концах деревянной рейки. Изменить момент инерции системы следует настолько, чтобы период колебаний маятника в два-три раза уменьшился,— в этом случае можно не определять время полных колебаний системы: зрители, находящиеся в аудитории, уловят изменение периода колебаний «на-глаз».

При демонстрации зависимости периода колебаний маятника от упругих свойств проволоки, следует заменить стальную проволоку другой, например латунной, той же длины и того же диаметра, что и первая проволока. Смена проволок должна давать хорошо заметное изменение периода колебаний системы. Этот опыт можно несколько варьировать, заменяя стальную или латунную проволоку проволоками из того же материала, но другой длины и другого сечения.

Во всех вариантах описываемого опыта необходимо предусмотреть быструю смену проволок в приборе. Для этой цели кольцеобразно изогнутые верхние концы проволок крепко поджимаются болтом *Б* к горизонтальному держателю штатива. Все нижние концы исследуемых проволок кончаются утолщениями (стержень *А* на рис. 2), которые пропускаются при закреплении через отверстие в деревянной рейке и прижимаются боковым винтом *В* (см. рис. 2). Такое крепление проволок обеспечивает достаточно хорошее центрирование всей колеблющейся системы и быструю смену исследуемых подвесов.

Примерные размеры демонстрационного крутильного маятника: длина деревянной рейки 50 см, длина проволоки 45—50 см, диаметр проволоки 1—1,5 мм, вес грузов 0,5—3 кг.

При указанных размерах крутильного маятника период его колебаний может варьироваться от 1 до 5 сек. Такая частота колебаний маятника удобна при демонстрировании опыта в аудитории.

Крутильный маятник может быть выполнен в виде крестовины, на концах которой располагаются на равных расстояниях от оси четыре одинаковых груза.

### 3. Сравнение продольных и крутильных колебаний

К концу цилиндрической пружины, закрепленной в держателе прочного вертикального штатива, подвешивается цилиндрический металлический стержень (рис. 3). Сначала стержень крепится так, что его ось совпадает с осью пружины. Закрутив стержень на небольшой угол, наблюдаем колебательные движения стержня под действием торсионных сил, развивающихся в закрученной пружине. Затем подвешиваем стержень иначе: ось стержня располагается перпендикулярно к оси пружины (это положение отмечено на рис. 3 пунктиром). В новом положении стержня вновь наблюдаем крутильные колебания после закручивания стержня на тот же угол. При втором способе крепления стержня период крутильных колебаний системы заметно возрастает вследствие резкого увеличения момента инерции системы.

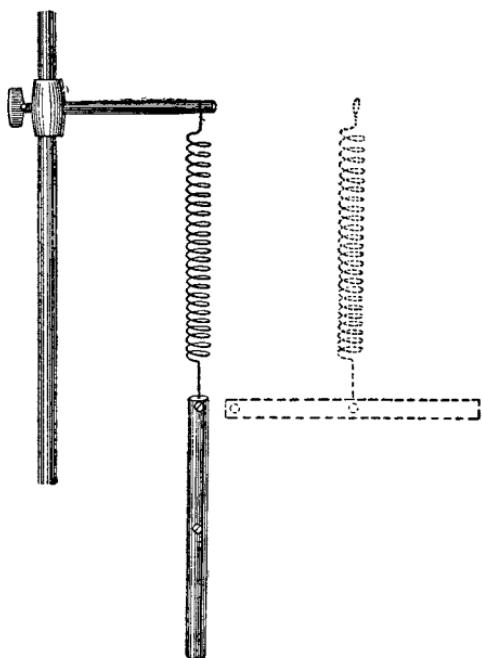


Рис. 3.

Затем наблюдаем колебания стержня вверх и вниз под действием упругих сил, вызванных растяжением спиральной пружины. При этом опыте измеряем период колебаний стержня, закрепив его в вертикальном и в горизонтальном положениях. Опыт покажет, что периоды продольных колебаний этой системы в вертикальном направлении не зависят от положений стержня, т. е. не зависят от момента инерции системы.

При постановке этого опыта необходимо следить, чтобы к движению стержня вверх и вниз не примешивались крутильные колебания. Для этого рекомендуется подобрать такую пружину и таких размеров стержень, чтобы период продольных колебаний значительно отличался от периода крутильных колебаний.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры пружины: диаметр стальной проволоки, из которой сделана пружина, 1 *мм*; число витков пружины 250; диаметр спирали 25 *мм*. Размеры стержня: длина 45—50 *см*, диаметр 18—20 *мм*.

2) Нижний конец пружины на протяжении нескольких сантиметров выпрямлен и занимает осевое положение по отношению к пружине.

3) Стержень имеет два отверстия, диаметр которых немного больше диаметра проволоки пружины. Первое отверстие просверливается в центре торцевой поверхности, второе — в середине боковой поверхности. Сбоку каждого отверстия имеются винты для крепления стержня к концу пружины. Такое крепление достаточноочно прочно и допускает быстрое изменение положения стержня по отношению к оси пружины при демонстрировании.

#### 4. Физический маятник

Четыре одинаковых металлических стержня укреплены в общей втулке в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Центр втулки пронизывается осью, укрепленной на конусах, которые проходят через середины вертикальных сторон рамы прибора (рис. 4). На конце каждого стержня расположен груз, который можно передвинуть и закрепить в любом месте с помощью бокового винта. С таким крестообразным маятником можно показать ряд демонстраций, иллюстрирующих свойства физического маятника.

Опыты с крестообразным маятником начинаем с расположения всех четырех грузов на равных расстояниях от оси вращения и с демонстрации безразличного равновесия такой системы. При отклонении маятник описывает определенный угловой путь и останавливается в произ-

вольном положении, не зависящем от исходного положения. Для обнаружения этого рекомендуется сделать метку краской или мелом на одном из стержней маятника и показать, что новое положение равновесия не совпадает с исходным.

Затем один из грузов располагаем несколько далее от оси вращения, чем три остальных груза, и демонстрируем превращение прибора в физический маятник. Если теперь отклонить маятник на небольшой угол, то после ряда затухающих колебаний он вернется к исходному положению равновесия. Сдвинув груз еще далее от оси, демонстрируем изменение периода колебаний.

На описываемом приборе необходимо порознь показать зависимость периода колебаний физического маятника от момента инерции и от расстояния между центром тяжести и осью маятника. С этой целью демонстрируем два опыта.

В первом опыте меняем момент инерции системы при неизменном расстоянии между центром тяжести и осью маятника. Для этого при неизменном положении грузов на вертикальных стержнях изменяем положение грузов на горизонтальных стержнях. Груз на верхнем вертикальном стержне располагаем вплотную со втулкой, на нижнем — примерно на середине стержня. Грузы, передвигаемые по горизонтальным стержням, располагаем сначала на концах стержней (на равных расстояниях от оси) и демонстрируем колебания этого физического маятника; затем сдвигаем горизонтальные грузы вплотную ко втулке — период колебаний значительно уменьшится вследствие уменьшения момента инерции системы.

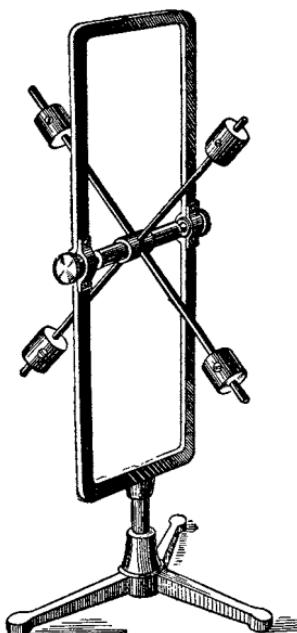


Рис. 4.

При демонстрации второго опыта меняем расстояние между центром тяжести и осью маятника при неизменном моменте инерции системы. Для этого грузы, располагаемые на горизонтальных стержнях, закрепляются на разных расстояниях от оси в неизменном положении. Груз 1, располагаемый на нижнем вертикальном стержне, закрепляется на самом конце, груз 2 на верхнем стержне — почти на конце (рис. 5, а). При таком расположении грузов на-

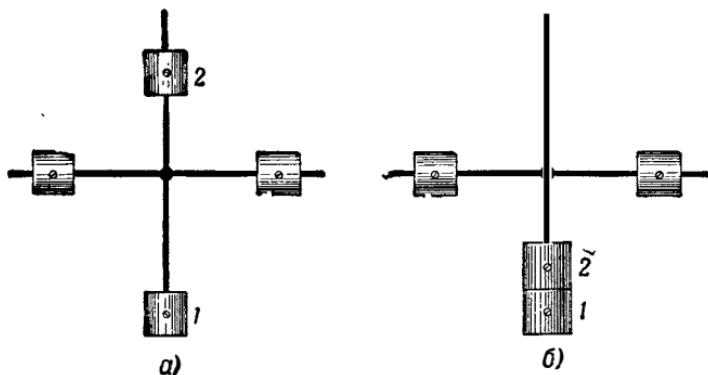


Рис. 5.

блюдаются колебания маятника с относительно большим периодом. Затем маятник поворачиваем на  $180^\circ$ , груз 1 переносим на конец противоположного стержня и закрепляем на том же расстоянии от оси (рис. 5, б); теперь частота колебаний маятника возрастет за счет опускания центра тяжести системы.

По всей длине стержней наносятся сантиметровые деления. В этом случае удобнее экспериментировать с прибором. Крепление оси на конусах регулируется боковыми винтами (рис. 4). Трение в опорах желательно уменьшить до минимума.

## 5. Центр качания

В верхней части металлического листа неправильной формы просверлено отверстие  $O$ . Вешаем лист этим отверстием на горизонтальный стержень, укрепленный в вертикальной деревянной стойке  $A$  (рис. 6). При отклоне-

нии на некоторый угол металлический лист совершает колебания. Этот прибор является физическим маятником.

На том же стержне подвешиваем на тонкой нити небольшой шарик *Б* (приближенная модель математического маятника); длину нити математического маятника подбираем равной приведенной длине физического маятника. Одновременно отклоняя лист и шарик, наблюдаем их изохронные колебания. Несколько изменения длину нити, на которой подвешен шарик (см. ниже), показываем нарушение изохронности в колебаниях маятников. Затем вновь восстанавливаем первоначальную длину математического маятника и проверяем синхронность колебаний обоих маятников. Далее поворачиваем лист на  $180^\circ$ , вешаем на стержень вторым отверстием, просверленным в центре качания физического маятника (совпадает с центром шарика *Б*), и вновь проверяем синхронность колебаний физического и математического маятников. Этот эксперимент является доказательством сопряженности точки подвеса и центра качания физического маятника.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры физического маятника: длина его по направлению *аб* равна 75 см, по направлению *ег* 60 см. Толщина листа 1 мм. Расстояние между двумя отверстиями в листе 45 см.

2) Горизонтальный стержень, на котором подвешиваются оба маятника, должен иметь длину не меньше 10—12 см. Место крепления нити маятника должно быть отодвинуто от точки опоры железного листа так, чтобы между ними было расстояние не меньше 2—3 см. В этом

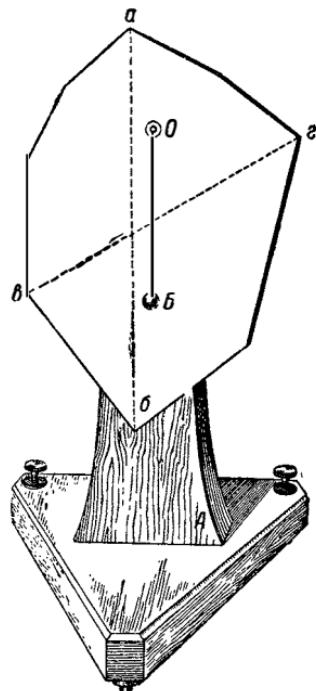


Рис. 6.

случае колеблющийся на фоне листа шарик не будет касаться листа.

3) Железный шарик снабжен небольшим винтом (длиной 1—1,5 см) с небольшим ушком в верхней части (рис. 7). За ушко шарик подвешивается. Наличие этого винта дает возможность экспериментатору точно подогнать длину математического маятника к приведенной длине физического маятника, а если необходимо, то и нарушить это равенство.



Рис. 7.

4) Последовательность в изготовлении этого прибора следующая: сначала просверливается первое отверстие в железном листе; затем с помощью шарика, колеблющегося одновременно с листом, определяется приведенная длина физического маятника; после этого просверливается второе отверстие в листе в центре качания физического маятника.

## 6. Колебания зажатой в тиски пружины

Стальная тонкая полоса (пружина) зажимается в тиски. На верхнем ее конце укрепляется деревянный шарик (рис. 8). При отклонении свободного конца в сторону пружина вместе с шариком совершает колебания. При достаточно большой длине пружины период колебаний настолько большой, что аудитория свободно следит за колебаниями шарика. Рекомендуется показать колебания пружины, зажимая ее тисками в трех-четырех различных местах, чтобы изменить тем самым длину вибрирующей части пружины. Для демонстрации зависимости периода колебаний от момента инерции пружины относительно оси колебания рекомендуется сопоставить два опыта: колебания пружины, нагруженной шариком, и колебания той же пружины, но без шарика.

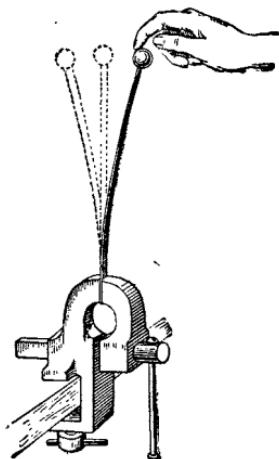


Рис. 8.

рика. Во всех случаях колебания пружины сильно затухающие.

Опыт демонстрируется в теневой проекции.

Примерные размеры стальной полоски: толщина ее 0,5 *мм*, длина 250 *мм*, ширина 18 *мм*. Диаметр шарика 35 *мм*.

### 7. Колебания столба жидкости в сообщающихся сосудах

Две стеклянные трубки диаметром  $\approx 15$  *мм* и длиной 600—700 *мм* соединяются между собой мягкой резиновой трубкой. Стеклянные трубки вертикально закрепляются в лапах двух штативов (рис. 9). Полученный таким образом U-образный сосуд наполняется подкрашенной водой так, чтобы уровень воды в стеклянных трубках находился примерно на середине высоты стеклянных трубок. Затем одну из трубок мы поднимаем на высоту 30—35 *см* (можно вместе со штативом) и быстро опускаем. Это вызовет колебания всего столба жидкости, наполняющего трубы. В этих условиях можно наблюдать до 8—10 затухающих колебаний водяного столба.

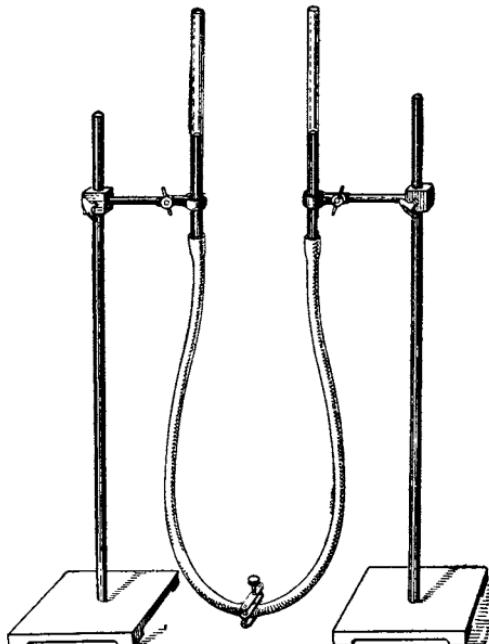


Рис. 9.

Если охватить зажимом резиновую соединительную трубку и тем самым уменьшить ее сечение, то трение, мешающее движению жидкости, возрастет. В этом случае

колебания столба жидкости будут еще более затухающими. Легко подобрать при помощи зажима такие условия колебаний, когда столб воды будет возвращаться к исходному положению, не проходя его в противоположном направлении (апериодическое движение столба жидкости). Если вместо воды налить в сосуд вязкую жидкость, например трансформаторное масло, то колебания столба жидкости будут резко затухающими или сразу апериодическими (без уменьшения сечения соединительной трубки).

*Практические указания.* 1) Уровень покоящейся жидкости в стеклянных трубках следует чем-нибудь отметить. Тонкое резиновое кольцо, надвинутое на одну из стеклянных трубок, может быть таким указателем.

2) Колебания жидкости в стеклянных трубках удобно вызывать так: поднять одну из трубок, затем перехватить

резину рукой и опустить трубку со штативом на демонстрационный стол; после освобождения резины возникают колебания столба жидкости.

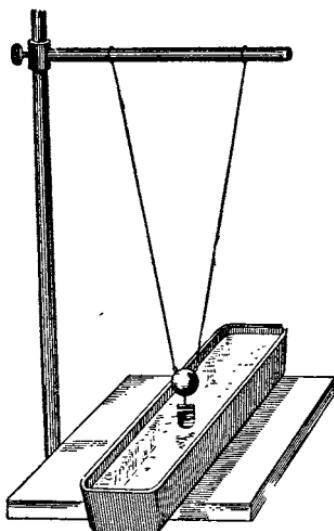


Рис. 10.

### 8. Влияние сопротивления среды на затухание колебаний маятника

Металлический шарик диаметром 4—5 см подвешиваем на двух равных нитях к штативу. Отклонив шарик на небольшой угол, оцениваем период вызванных колебаний и степень их затухания. Затем к нижней части шарика прикрепляем небольшую металлическую пластинку-демпфер (примерные раз-

меры 3 см × 4 см) и вновь повторяем опыт. Теперь сопротивление среды возрастает, что должно несколько сказаться на колебаниях шарика.

Однако колебания шарика можно изменить более резко, если опустить пластинку-демпфер в сосуд, напол-

ненный водой. Для этого под шариком устанавливаем продолговатый сосуд на такой высоте, чтобы пластиночка полностью погрузилась в воду (рис. 10). Если теперь вызвать колебания, то степень их затухания будет несравненно большей, чем в предыдущем случае.

Еще более значительные затухания колебаний шарика будут наблюдаться при заполнении сосуда маслом. При достаточно густом масле колебания превратятся в апериодическое движение.

## 9. Колебания медной пластины в магнитном поле

Медная пластина  $A$ , скрепленная металлическими стержнями с осью  $OO_1$ , подвешивается к держателю массивного штатива (рис. 11). По обеим сторонам этого маятника располагаются (примерно на равных расстояниях) полюсы электромагнита. Если пластину вывести из положения равновесия, то она довольно длительное время колеблется со сравнительно небольшим декрементом затухания. Если же включить постоянный ток в обмотку электромагнита и создать тем самым магнитное поле между полюсами, то колебания будут более затухающими: в медной пластине индуцируются токи Фуко, которые тормозят колебания маятника.

Реостат, включенный в цепь обмотки электромагнита (не изображен на рисунке), дает возможность плавно изменять силу тока в обмотке и тем самым изменять напряженность магнитного поля между полюсами. При наличии такого реостата можно продемонстрировать колебания маятника при различных степенях их затухания. Рекомендуется в цепь обмотки электромагнита включить демонстрационный амперметр: по показаниям этого прибора аудитория качественно оценивает напряженность магнитного поля между полюсами.

Если создать между полюсами магнита достаточно сильное магнитное поле, то торможение маятника магнитным полем будет весьма заметным и создастся впечатление, что маятник движется в какой-то вязкой среде. Движение маятника в этом случае может быть полностью

апериодическим. Демонстрация особенно убедительна, если лектор покажет подряд, один за другим, оба варианта опыта: без поля и при наличии сильного поля.

*Практические указания.* 1) Пластина *A* имеет форму, несколько напоминающую трапецию или часть плоского кольца. Примерные размеры пластины: нижняя грань 25 см, верхняя 21 см, боковые грани 13 см. Толщина пластины 5 мм.

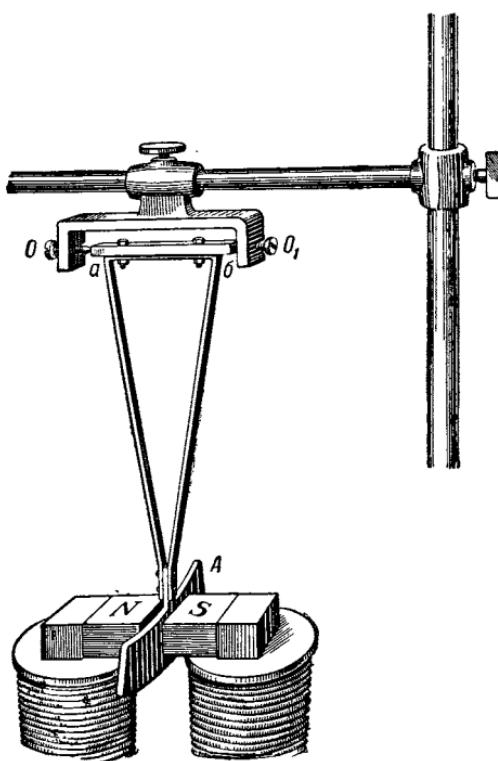


Рис. 11.

2) Стержни, поддерживающие медную пластину, также изготовлены из меди. Длина стержней  $\approx 40$  см, толщина 2—2,5 мм. Эти стержни расположены друг к другу под углом 15—20° (рис. 11). Верхние части стержней жестко скреплены с металлическим бруском *ab* (диаметр 2—2,5 см), в торцы которого входят стальные конусы. При таком креплении маятника степень его затухания без магнитного поля невелика.

Можно изготовить маятник, снабженный несколькими съемными пластинами одинакового размера, но из различных неферромагнитных материалов. При наблюдении колебаний этих пластин в магнитном поле одинаковой напряженности мы обнаружим, что степень затухания колебаний зависит от омического сопротивления каждой демонстрируемой пластины.

## 10. Колебания магнитной стрелки в магнитном поле

Известно, что магнитная стрелка под действием магнитного поля располагается по направлению вектора поля не сразу. Стрелка, отведенная в сторону, много раз переходит положение своего равновесия, осуществляя тем самым затухающие колебания (см. «Лекционные демонстрации по физике, выпуск 3 (Магнетизм)», стр. 210). Удобно ставить этот опыт, располагая стрелку в кольцах Гельмгольца. Изменяя силу тока в обмотке колец, можно показать зависимость периода колебаний стрелки от величины напряженности магнитного поля, действующего на стрелку.

## 11. Колебания ферромагнитного стержня или шарика в магнитном поле

Для демонстрации зависимости периода колебаний физического или математического маятника от силы поля тяжести (от величины  $g$ ) следует показать такой опыт. Сначала демонстрируем колебания ферромагнитного стержня или шарика в поле тяжести, затем создаем магнитное поле, притягивающее книзу колеблющийся стержень. Появление добавочной силы, направленной вниз, эквивалентно усилению поля тяжести — период колебаний ферромагнитного стержня уменьшается (см. «Лекционные демонстрации по физике, выпуск 3 (Магнетизм)», стр. 42).

## 12. Гармонические колебания

При рассмотрении на лекции законов гармонического колебания рекомендуется показать на экране движение тени, получаемой от проектирования шарика, который равномерно вращается в плоскости, перпендикулярной к экрану. Демонстрация дает много полезного иллюстративного материала.

Опыт ставится таким образом. Деревянный диск диаметром около 1 м с рядом небольших отверстий устанавливается на центробежной машине с помощью металличе-

ского стержня, закрепленного в центре диска (рис. 12). В одно из отверстий диска плотно вставляется стерженек длиной 10—12 см, на конце которого насажен деревянный шарик диаметром 3—4 см. Центробежная машина вместе с диском располагается на расстоянии 1,5—2 м от проекционного фонаря, приготовленного для теневой проекции. Центробежную машину следует установить относительно

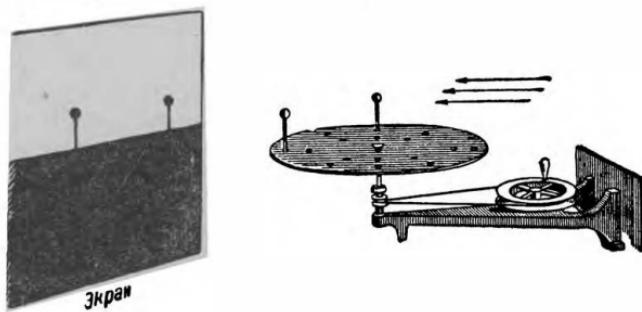


Рис. 12.

точечного источника света так, чтобы на середине экрана была получена достаточно четкая и не размытая с краев тень от стержня и шарика. При вращении центробежной машины тень от шарика должна двигаться по прямой линии. Демонстрацию нельзя считать удовлетворительной, если при вращении центробежной машины тень от шарика описывает на экране эллипс или петлю — в таком виде демонстрация может вызвать со стороны слушателей ряд недоуменных вопросов.

Начинать демонстрацию опыта необходимо с сопоставления равномерного вращения шарика с неравномерным движением тени от этого шарика по экрану. В больших физических аудиториях, где в большинстве случаев скамьи расположены амфитеатром, зрители без труда могут следить одновременно за двумя этими движениями. При сравнении этих движений следует обратить внимание зрителей на те моменты, когда скорость движения тени равна нулю или достигает наибольшей величины.

За теневой проекцией шарика на экране удобнее наблюдать в том случае, если к шарику или к стержню, чуть пониже шарика, прикреплена картонная или метал-

лическая стрелка, расположенная по направлению касательной к диску. Стрелка характеризует величину и направление скорости шарика при равномерном его вращении, а тень от стрелки — величину и направление скорости гармонически колеблющейся точки. При проектировании движения шарика на экран тень от стрелки непрерывно меняется. Когда шарик движется параллельно экрану, стрелка проектируется своей полной величиной, что в нашем модельном опыте соответствует максимальной скорости точки, совершающей гармоническое движение. Когда шарик движется перпендикулярно к экрану, то проекция стрелки на экран уменьшается до размеров ее поперечного сечения, что соответствует нулевой скорости гармонически колеблющейся точки. Следует обратить внимание аудитории на то, что тень, совершающая гармоническое движение, обладает максимальной скоростью при прохождении положения равновесия и минимальной (нулевой) скоростью в крайних положениях.

Далее стержень с шариком следует перенести в другое отверстие на деревянном диске, находящееся на ином расстоянии от оси вращения, и снова показать этот опыт.

Можно проделать еще такой опыт. Стрелка, прикрепленная к шарику, поворачивается так, чтобы она расположилась вдоль радиуса, остирем к центру диска. Теперь стрелка изображает величину и направление ускорения шарика при его равномерном круговом движении, а тень от этой стрелки на экране отобразит величину и направление ускорения точки при гармоническом движении.

Если установить на деревянном диске два стержня с шариками и следить за движением их теней по экрану при равномерном вращении диска, то полученная на экране картина дает иллюстративный материал к понятию фазы колебания. Опыт следует начать с наблюдения за двумя колебательными движениями теней, обладающими одной частотой колебания, одинаковой фазой, но разными амплитудами; для этого два стержня с шариками необходимо вставить в отверстия диска, лежащие по линии одного радиуса (рис. 13, а), и продемонстрировать движение теней от этих шариков на экране. Затем демонстри-

руются колебательные движения двух теней с одной частотой и амплитудой, но сдвинутых по фазе на угол  $180^\circ$ ; для наблюдения этого варианта опыта стержни располагаются на равных расстояниях от оси вращения диска, но по линии одного диаметра (рис. 13, б). Наблюдая за движением на экране теней от этих шариков, мы заметим, что в первую половину периода тени идут навстречу друг другу, одновременно проходят положение

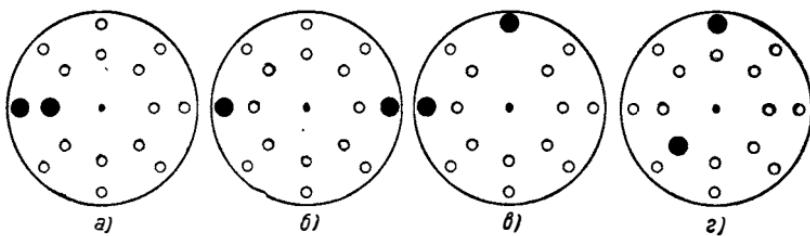


Рис. 13.

равновесия, а затем движутся в разные стороны; далее подобное движение теней от шариков периодически повторяется.

Затем стержни с шариками располагаются на радиусах, составляющих угол  $90^\circ$ , и при этом на равных расстояниях от оси вращения (рис. 13, в). В этом случае при равномерном вращении диска мы увидим на экране колебания двух теней, сдвинутых друг относительно друга на четверть периода. Следует обратить внимание аудитории на то, что в этом случае в первую четверть периода тени от шариков движутся в одну сторону, как бы догоняя друг друга, а в следующую четверть периода — в разные стороны, идя навстречу друг другу; далее явление периодически повторяется. В заключение этой серии демонстраций следует сопоставить гармонические движения двух тел, отличающихся друг от друга как по фазе, так и по амплитуде; для этого можно расположить два стержня с шариками примерно так, как показано на рис. 13, г.

Рассматриваемый демонстрационный прием не дает возможности сравнивать два гармонических движения различных частот.

*Практические указания.* 1) В целях воспроизведения возможно большего числа вариантов сопоставления колебательных движений рекомендуется на деревянном диске нанести шестнадцать отверстий: восемь отверстий по окружности наибольшего радиуса, а восемь по окружности радиуса, примерно в два раза меньшего. Необходимо, чтобы каждая пара отверстий лежала на одном радиусе (см. рис. 13).

2) Удобнее пользоваться при постановке этого опыта не центробежной машиной, а устойчивой треногой, в середине которой вделана ось со шкивом (см. «Лекционные демонстрации по физике», выпуск 2, стр. 38).

## II. ЗАПИСЬ КОЛЕБАНИЙ

### 13. Маятник с песком

Небольшая воронка подвешивается на тонких длинных стальных проволоках (примерно 1,5—2 м каждая) к устойчивому штативу (рис. 14). Под воронкой располагается большой лист картона. Воронка наполняется мелким песком и слегка отклоняется из положения равновесия.

При колебаниях воронки песок высыпается из нее тонкой струей, образуя на картоне прямолинейный след. Если лист картона при этом равномерно продвигать перпендикулярно к плоскости колебания воронки, то струя высыпающегося песка опишет синусоиду.

Если опыт ставится в аудитории, где скамьи расположены амфитеатром, то полученная на картоне синусоида хорошо видна со всех рядов аудитории, расположенных несколько выше уровня демонстрационного стола. Можно записанную песком кривую отдельно показать после опыта. Лист картона вытаскивается из-под воронки и демонстрируется всей аудитории в наклонном положении. Для устранения скатывания песчинок и тем самым размазывания синусоиды рекомендуется взять картон с шероховатой поверхностью. Можно для увеличения шерохова-

тости оклеить поверхность листа грубой материей, наждачной бумагой и т. д.

Опыт можно варьировать, меняя частоту колебаний воронки и скорость продвижения листа картона под ней. Для большей устойчивости в движениях воронки рекомендуется укрепить ее с помощью корковой пробки в металлическом кольце (рис. 14).

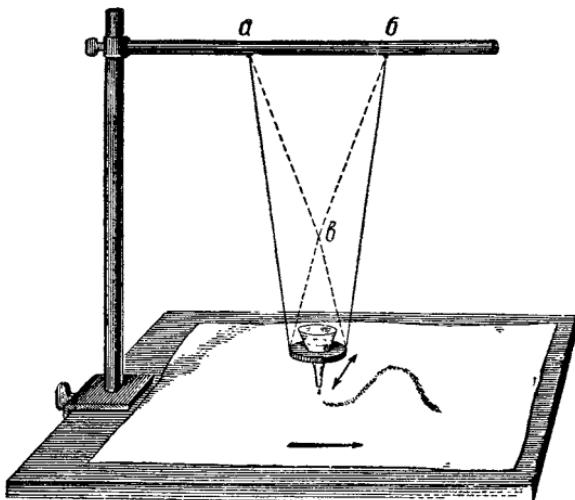


Рис. 14.

Песок для этого опыта следует просеять через сито. Удобно взять для этого опыта белый кварцевый песок, который хорошо виден издали на темном фоне картона.

#### 14. Запись колебаний на закопченной стеклянной пластинке

К одной из ветвей камертонна прикрепляется тонкая стальная полоска, заостренная на конце\*). Возбудив камертон деревянным молотком, быстро проводим камертоном над закопченной поверхностью стекла перпендикулярно к направлению движения ветвей камертонна,

\*) Для этого опыта рекомендуется взять камертон низкого тона с относительно длинными и тонкими ветвями.

стараясь касаться поверхности стекла лишь концом стальной полоски. Если камертон достаточно сильно возбужден и экспериментатор равномерно касался стальной полоской слоя копоти при продвижении вибрирующего камертона, то на стекле будет процарапана синусоида. Полученную синусоиду обычно показывают на экране, пользуясь проекционным фонарем.

При наличии в физическом кабинете большого фонаря, предназначенного для горизонтальной проекции, операцию получения синусоиды на закопченном стекле можно непосредственно проектировать на экран. Закопченное стекло располагается горизонтально на фонаре и демонстратор тут же проводит над стеклом вибрирующим камертоном. Конечно, проекция камертона и руки экспериментатора на экране не будет особенно четкой, однако аудитория вполне ясно представит операцию получения графика колебаний. В итоге на темном фоне экрана отчетливо будет видна процарапанная синусоида.

Для получения четкой записи колебаний на стекле необходимо нанести на его поверхность тонкий и равномерный слой копоти. Для этого стеклянную пластинку располагаем на высоте 25—40 см над коптящим пламенем газовой горелки и равномерно перемещаем ее в горизонтальной плоскости. Можно это проделать над пламенем горящей ваты, пропитанной скрипидаром. Хорошие результаты получаются при горении чистого бензола. Для этой цели наливается в металлический сосуд немногого чистого бензола (не больше чайной ложки). В этом случае копоть получается мелкая, ровная и без заметных хлопьев.

В демонстрационной практике встречаются приборы с несколько механизированной записью колебаний на закопченной пластинке. Эти приборы разнообразны, но обычно основой конструкции является камертон с металлическим пером, закрепленный неподвижно в штативе, и закопченная стеклянная пластинка, быстро продвигающаяся под камертоном вдоль направляющих стержней. Продвижение пластинки осуществляется с помощью какого-либо пружинного механизма или просто под действием растянутой резины.

На некоторых приборах можно одновременно записывать колебания двух камертонов на одной пластинке. Весьма полезна в методическом отношении подобная запись колебаний двух камертонов разного периода. В этом случае зритель непосредственно убеждается в том, что число полных колебаний камертонов за один и тот же промежуток времени может быть различным. На подробном рассмотрении этих типов демонстрационных приборов мы не останавливаемся.

### 15. Запись колебаний электрокамертона на экране

Чтобы продемонстрировать на экране график синусоидальных колебаний, удобно воспользоваться электрокамертоном, т. е. камертоном с электромагнитным возбуждением. Прерыватель, расположенный в цепи электромагнита, разрывает цепь с частотой собственных колебаний камертона, что обеспечивает незатухающие колебания последнего.

Некоторые конструктивные данные о демонстрационных электрокамертонах. Собственно камертон изготавливается обычно из лучших сортов стали. Примерные его размеры: длина 250 *мм*, поперечное сечение ветви 10 *мм* × 18 *мм*. Собственная частота камертона около 50 *гц*. На одной из ветвей камертона укреплено круглое зеркало диаметром 12—14 *мм*, предназначенное для отбрасывания светового пучка на экран. Крепление зеркала осуществляется или на торцевой или на боковой поверхности ветви камертона, у самого ее конца (рис. 15). Электромагнит с прерывателем, возбуждающий ветви камертона, можно передвигать вдоль рейки, расположенной параллельно ветвям камертона. Чем ближе электромагнит расположен к концам камертона, тем большие размахи получат ветви камертона. Во избежание порчи камертона избегают сильно возбуждать его. Электромагнит закрепляется обычно на рейке вблизи стебля камертона, примерно на расстоянии одной трети длины ветвей камертона. Весь прибор (камертон, рейка, электромагнит с прерывателем и другие детали) монтируется на массивном штативе.

Электрокамертон можно вращать в штативе по отношению к трем взаимно перпендикулярным осям; кроме того, электрокамертон можно передвигать вверх и вниз по вертикальному стержню штатива. Штатив снабжен уравнительными винтами. Все это облегчает налаживание опытов с электрокамертоном в аудитории.

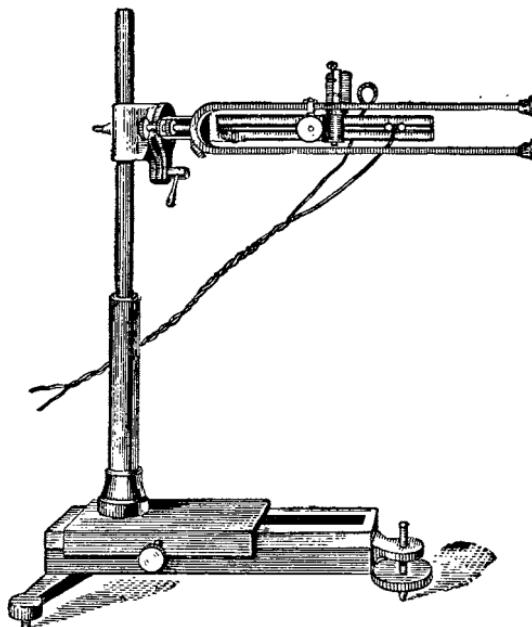


Рис. 15.

Для демонстрации графика колебаний камертона на экране собирают установку, схематично изображенную на рис. 16. Предполагается, что проекционный фонарь располагается на демонстрационном столе, где устанавливаются все другие необходимые для опыта приборы: электрокамертон, закрепленная в штативе линза, вращающееся отражающее зеркало и т. д. Обычно в качестве отражающего зеркала применяют вращающуюся призму с боковыми поверхностями в виде плоских зеркал (число плоскостей такой призмы может доходить до 12 и более).

Слабо сходящийся пучок света от проекционного фонаря посыпается на отверстие диафрагмы (диаметр 2—3 мм), вставленной в конус фонаря. Затем пучок света падает на зеркало камертона, далее на одну из плоскостей вращающегося зеркала и, наконец, на экран. Линза, расположаемая между диафрагмой и зеркалом камертона, помещается так, чтобы на экране получилось четкое изображение отверстия диафрагмы.

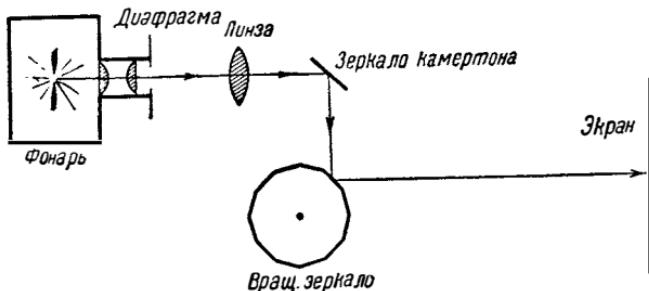


Рис. 16.

При вращении отражающего зеркала светлое пятно на экране должно превратиться в горизонтальную линию. Если вызвать колебания электро камертона при покоящемся отражающем зеркале, то светлое пятно на экране растягивается в вертикальную линию, длина которой для большой аудитории должна быть не меньше 30—40 см. При вращении отражающего зеркала вертикальные колебания светлого пятна на экране будут растянуты в синусоиду. Вращение отражающего зеркала должно быть достаточно быстрым и равномерным. Только в этом случае на экране будет получена ровная синусоидальная линия, простирающаяся по всей ширине экрана. Отражающее зеркало приводится во вращение или от руки или с помощью небольшого моторчика (типа патефонного).

Для получения четкой картины на экране вращающееся зеркало должно удовлетворять следующим условиям: взаимное расположение отдельных плоскостей зеркала должно быть таким, чтобы все грани зеркала при повороте их на равные углы отражали пучок света

в одну и ту же точку экрана. Это необходимо предварительно проверить, медленно вращая зеркало. Хорошо изготовленное вращающееся зеркало снабжено винтами (по числу плоскостей зеркала), с помощью которых можно изменять наклон каждого зеркала. Вращающееся зеркало, изготовленное в физическом кабинете МГУ (рис. 17), имеет следующие размеры: диаметр каркаса, на котором крепятся плоские зеркала, 25 см; размеры плоских зеркал: 60 мм  $\times$  130 мм; число плоских зеркал 12. Каркас, на котором крепятся зеркала, металлический. Через центр каркаса проходит ось, на которую насажен шарикоподшипник. Шарикоподшипник в свою очередь укрепляется в массивном штативе, в котором металлический каркас зеркала может плавно вращаться. Вся система отражающих зеркал приводится во вращение небольшим мотором, который можно закрепить тут же на вертикальном стержне штатива. Желательно предусмотреть возможность в небольших пределах регулировать число оборотов этого мотора.

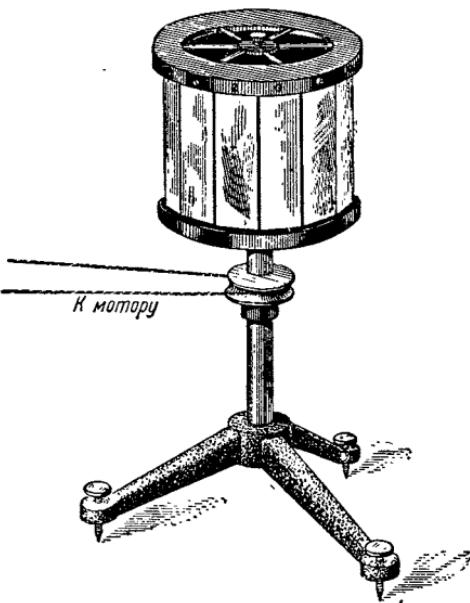


Рис. 17.

## 16. График сильно затухающих колебаний

Деревянная или, лучше, пробковая пластинка с прикрепленным к ней зеркальцем прижата струбцинками к массивному куску свинца (рис. 18). Отклонив рукой свободный конец пластиинки в сторону, вызываем колебания

всей пластинки. Для наблюдения этих колебаний направляем на зеркальце пучок света и с помощью вращающегося зеркала получаем горизонтальную развертку колебаний светового пучка на экране (см. демонстрацию «Запись колебаний электрокамертона на экране»). Колебания пластиинки будут настолько сильно затухающими, что на экране уложится не больше 2—3 периодов этой кривой при каждом возбуждении пластиинки.

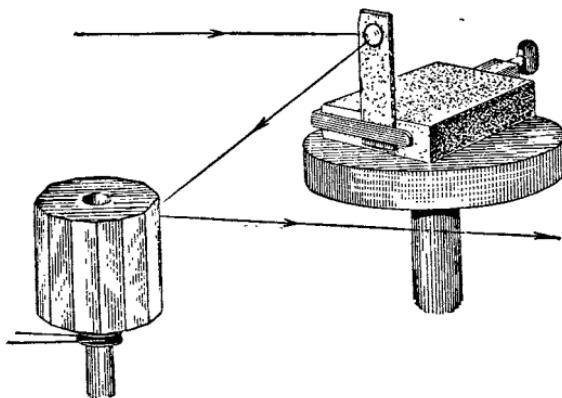


Рис. 18.

Размеры пробковой пластиинки  $0,5 \text{ см} \times 5 \text{ см} \times 12 \text{ см}$ . Куску свинца лучше придать форму прямого параллелепипеда. В этом случае удобнее крепить пластиинку к свинцу.

В этом варианте опыта зеркало следует вращать медленно, от руки.

### 17. Наблюдение колебаний электронного пучка

В целом ряде случаев изучение механических колебаний может быть сведено к изучению электрических величин, изменяющихся во времени точно так же, как и первые. Например, колебания мембранны микрофона под действием звуковых волн превращаются в соответствующие колебания силы микрофонного тока, колебания земной коры вызывают образование переменной электродвигущей силы в катушке сейсмографа и т. д. Подобная

замена механических колебаний электрическими часто весьма удобна: экспериментальное исследование электрических колебаний значительно проще, чем механических. Это особенно сделалось очевидным в последние годы, когда физик-экспериментатор получил в свои руки такой универсальный прибор, каким является электронно-лучевой осциллограф. С появлением этого прибора значительно возросли экспериментальные возможности физика при исследованиях колебательных процессов. В равной степени значительно обогатилась и демонстрационная техника. Некоторые физические опыты, которые ранее вовсе не показывались в аудитории, теперь демонстрируются с помощью электронного осциллографа. Многие физические явления, обычно воспроизводимые устаревшими приемами, получили большую убедительность и наглядность при применении электронного осциллографа.

При рассмотрении опытов по колебаниям и акустике, которые поставлены с помощью электронного осциллографа, мы будем предполагать, что в распоряжении физического кабинета имеются приборы, выпускаемые отечественной промышленностью, например электронные осциллографы ЭО-5 или ЭО-4. Можно изготовить подобный прибор для демонстрационных целей силами физического кабинета. Материал по этому вопросу можно найти в выпусках 3 и 6 «Лекционных демонстраций по физике», а также в специальной литературе \*).

Напомним общие принципы работы электронного осциллографа и в общих чертах опишем его устройство.

Основная часть прибора — конусообразная трубка (баллон), из которой откачен воздух до значительных разрежений. Внутри этого баллона находится несколько электродов (рис. 19): нить накала (катод) 1, фокусирующий цилиндр 2, анод 3 и две пары горизонтальных и вертикальных пластин (4, 4а и 5, 5а).

---

\*) Шкурин Г. П., Электроизмерительные и радиоизмерительные приборы, Военгиз; Шкурин Г. П., Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военно-морское издательство, 1950; Стекольников И. С., Электронная осциллография кратковременных процессов, Гостехиздат, 1952, и др.

Накаливаемая электрическим током нить испускает электроны, которые устремляются с громадными скоростями к положительно заряженному аноду. Анод имеет форму диска с отверстием в центре. Сквозь это отверстие часть потока электронов прорывается в конусообразную часть баллона. Широкое основание баллона с внутренней стороны покрыто флуоресцирующим составом. При «бомбардировке» электронами флуоресцирующего экрана мо-

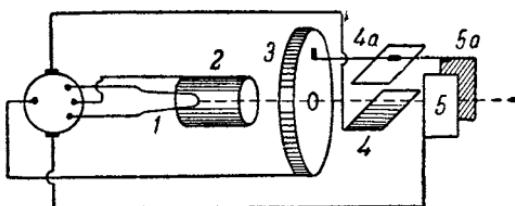


Рис. 19.

лекулы вещества экрана приходят в возбужденное состояние, и «бомбардируемое» место экрана светится. Если поток электронов под действием электрического поля отклонится, то соответственно передвинется по экрану флуоресцирующее пятно. По характеру смещения светящегося пятна можно судить о величине и характере изменения электрического поля, вызвавшего это смещение.

В целях сужения пучка летящих электронов электронный осциллограф снабжен добавочным цилиндрическим электродом (фокусирующим цилиндром), вдоль оси которого пролетают электроны в направлении анода.

Электронные осциллографы, выпускаемые нашей промышленностью, снабжены ламповыми усилителями для увеличения исследуемого напряжения, генератором либообразного напряжения, выпрямителем переменного тока для питания анодов всех ламп осциллографа и усилителей и т. д. Весь осциллограф помещен внутри железного, прочно изготовленного ящика. На наружную панель осциллографа выведены все ручки пульта управления электронным осциллографом: регуляторы вертикального и горизонтального усилителей, ручки, регулирующие

фокусировку, яркость и положение электронного пятна на флуоресцирующем экране, регуляторы генератора развертки и др. (рис. 20)\*).

Таково в самых общих чертах устройство электронного осциллографа. Остальные детали схемы и правила эксплоа-

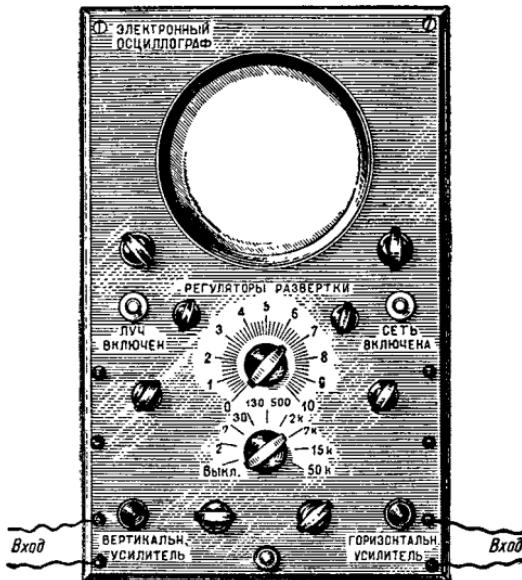


Рис. 20.

тации электронного осциллографа можно почерпнуть из инструкции, которой обычно снабжен каждый отдельный прибор.

В демонстрациях, иллюстрирующих разделы «Механические колебания» и «Звук», электронный осциллограф

\*) Во избежание путаницы внесем уточнение: пластины 4 и 4<sub>a</sub> расположены горизонтально (рис. 19); при подаче на них электрического напряжения след электронного пучка отклоняется в вертикальном направлении, поэтому эти пластины обычно называют вертикально-отклоняющими, а усилитель, связанный с ними, называют вертикальным усилителем. Соответственно пластины 5 и 5<sub>a</sub> (рис. 19) называются горизонтально-отклоняющими и связанный с ними усилитель — горизонтальным.

играет теперь столь важную роль, что этот прибор стоит специально продемонстрировать в аудитории. Для этого ставится опыт по наблюдению колебаний электронного пучка под действием переменного электрического поля.

Собирается схема, изображенная на рис. 21. Электронный осциллограф ЭО-5 включается в цепь переменного 50-периодного тока согласно указателю, имеющемуся на задней панели осциллографа (на рис. 21 дано схемати-

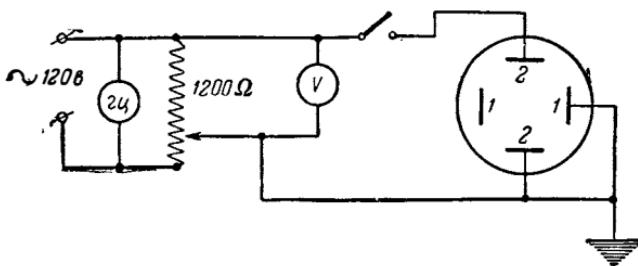


Рис. 21.

ческое изображение осциллографа с двумя парами отклоняющих пластин: 1 — пластины, дающие горизонтальное смещение пучка; 2 — пластины, дающие вертикальное смещение пучка). После получения свечения на флуоресцирующем экране светлое пятно фокусируется до 1—2 мм в диаметре и передвигается с помощью специальных регуляторов, выведенных на переднюю панель прибора, на центральную часть экрана (рис. 22, а).

Затем подается на вертикальные пластины осциллографа переменное напряжение от городской сети (50 гц). Если подается напряжение 70—200 в, то нет надобности пользоваться ламповым усилителем (ручку вертикального усилителя необходимо вывести до отказа). Если же подаваемое напряжение мало (доли вольта или несколько вольт), то следует подаваемое напряжение усилить. Под действием переменного напряжения светлое пятно на экране превратится в сплошную вертикальную линию (рис. 22, б). Если присмотреться к ней, то можно заметить, что концы линии несколько ярче середины. Эта неравномерность в свечении объясняется тем, что вслед-

ствие синусоидального изменения величины напряжения, отклоняющего электронный пучок, продолжительность бомбардировки электронами за один период крайних частей этой линии больше, чем средних. Длина светлой полосы на экране осциллографа должна составлять примерно  $\frac{2}{3}$  диаметра экрана.

Для рассмотрения закона смещения электронного пучка во времени необходимо растянуть светлое пятно по горизонтали. Это обычно делается следующим образом: на горизонтально-отклоняющие пластины осциллографа прикладывается напряжение пилообразной формы (см.

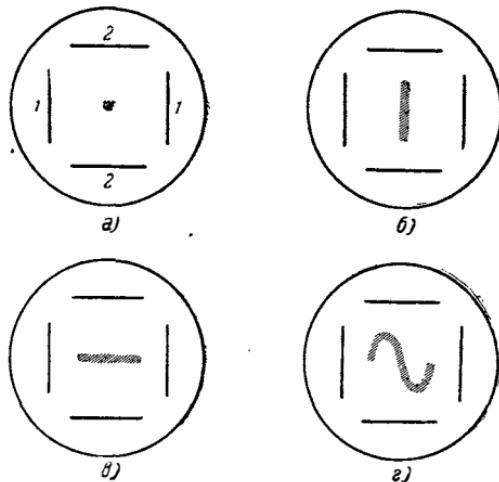


Рис. 22.

рис. 23; здесь  $t_1$  — время прямого хода луча,  $t_2$  — время обратного хода луча;  $t_1 \approx 1000t_2$ ). Существует много схем ламповых генераторов, дающих напряжение такой формы. Колебания величины напряжения в подобных генераторах происходят со строго определенной частотой. Частоту пилообразных колебаний можно плавно регулировать специальными регуляторами, предусмотренными в заводских моделях электронного осциллографа. При подаче такого напряжения на горизонтально-отклоняющие пластины осциллографа электронный пучок будет отклоняться по горизонтали (рис. 22, d), причем степень отклонения его в этом направлении будет возрастать по мере увеличения во времени значения пилообразного напряжения. Когда отклоняющее напряжение спадет до нуля, электронный пучок почти мгновенно вернется к начальному положению. Если частота пилообразного напряжения совпадает с частотой исследуемого напряжения, то

одно полное колебание электронного пучка по вертикали будет растянуто за то же время в горизонтальном направлении. При этих условиях на экране светлая вертикальная линия превратится в неподвижную синусоиду (рис. 22, *г*). Если же частота развертки электронного пучка по горизонтали будет в два раза меньше частоты колебания электронного пучка по вертикали, то на экране будем иметь два периода синусоиды и т. д.

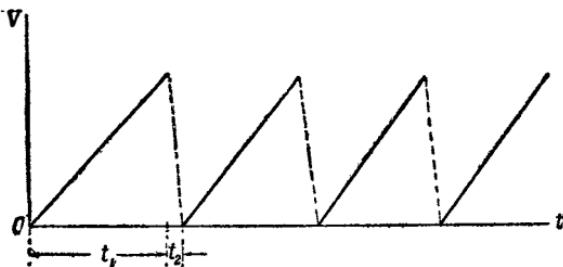


Рис. 23.

Следует заметить, что частота развертки не должна быть очень малой (не меньше 25—50 гц), ибо в противном случае зритель увидит колебание светлого пятна по горизонтали.

Если электронный осциллограф снабжен градуировочной кривой для генератора развертки, то легко определить частоту переменного тока, подаваемого на вертикально-отклоняющие пластины. Включенный в цепь демонстрационной установки частотомер дает контрольные показания (см. схему опыта на рис. 21).

### 18. Запись электрических колебаний на шлейфовом осциллографе

Изменения электрических величин во времени (сравнительно небольших частот) можно в ряде случаев свести к соответствующим движениям легких механических систем. В этом случае изучение электрических процессов заменяется изучением соответствующих механических явлений. Приборы, построенные по этому принципу,— инер-

ционные осциллографы — нашли довольно широкое распространение в измерительной технике.

Рассмотрим устройство шлейфового осциллографа, употребляемого для демонстрационных целей.

Между полюсами электромагнита натянута длинная узкая петля *A*, изготовленная из тонкой проволоки или, лучше, из очень тонкой металлической ленты. Петля

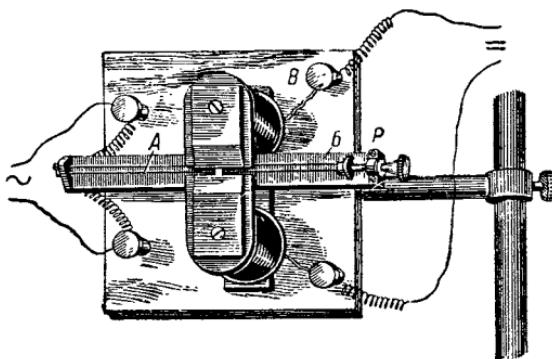


Рис. 24.

крепится на узкой эbonитовой панели *B*, прижатой винтами к общей стойке прибора *B* (рис. 24). Слева концы петли поджаты под винты, соединенные с клеммами для подачи тока в петлю прибора; справа петля оттягивается небольшим роликом *P*, укрепленным на общей панели *B*. Ролик с помощью винта с мелкой резьбой можно плавно передвигать, изменяя тем самым натяжение обеих проволочек петли.

В средней части петли прикреплено небольшое зеркальце. Петля вместе с зеркальцем обычно называется шлейфом, откуда и происходит название прибора — шлейфовый осциллограф.

Если пропустить по шлейфу осциллографа переменный ток небольшой силы, то направления тока в ветвях шлейфа в любой момент времени будут противоположными. Вследствие этого зеркальце шлейфа будет поворачиваться (колебаться) около средней линии с частотой пропускаемого тока. Угол максимального поворота зеркальца,

закрепленного на шлейфе, определяется силой тока, пропускаемого по шлейфу, и напряженностью магнитного поля между полюсами электромагнита.

При пропускании по шлейфу осциллографа 50-периодного переменного тока колебания зеркальца будут столь часты, что уловить их на-глаз, без специальных приспособлений, невозможно. Чтобы продемонстрировать в аудитории, как при помощи шлейфового осциллографа записываются колебания силы переменного тока, надо воспользоваться проекционным фонарем, вращающимся зеркалом и фокусирующей линзой. Расположение этих приборов такое же, как и при проектировании колебаний ветвей электрокамертона (см. демонстрацию 15). Существенно помнить, что свет от проекционного фонаря подается на диафрагму слабо сходящимся пучком. Отверстие диафрагмы с помощью линзы должно проектироваться на экран. В зависимости от фокусного расстояния линзы она помещается либо до зеркала осциллографа, либо после него.

*Практические указания.* 1) Ленточки для шлейфа тянутся из фосфористой бронзы. Примерные размеры ленточки: толщина 0,01 м.м., ширина 0,2 м.м., длина каждой ветви 140 м.м.

Размеры зеркальца 2,5 м.м.  $\times$  2,5 м.м. Зеркальце крепится к ветвям шлейфа шеллаком.

Токи, пропускаемые по шлейфу, невелики: примерно 0,02—0,05 а.

2) Шлейфовый осциллограф как любая механическая система обладает собственной частотой колебаний. Если исследуемый переменный ток попадет в резонанс с собственной частотой шлейфа, то ветви шлейфа начнут сильно вибрировать. В целях исключения этого явления рекомендуется: а) изменять регулировочным винтом натяжение нитей шлейфа, как только система будет приближаться к резонансу, или б) увеличить каким-либо способом затухание шлейфа.

Для увеличения затухания можно шлейф прибора погрузить в масло. В демонстрационной практике иногда пользуются еще таким приемом: на нижнем полюсе электромагнита припаивают две небольшие латунные (нефер-

ромагнитные) скобы, обращенные расширением вверх. Скобы располагают по обеим сторонам зеркальца таким образом, чтобы не мешать колебаниям шлейфа. Пустив в эти скобы несколько капель трансформаторного масла, экспериментатор достигает необходимого для опыта демпфирования.

3) Описываемый демонстрационный осциллограф монтируется на небольшой деревянной досочке ( $14\text{ см} \times 14\text{ см}$ ), снабженной латунным стержнем для закрепления всего прибора в устойчивом штативе (см. рис. 24).

4) Весьма часто осциллограф снабжается не одним шлейфом, а двумя или даже несколькими. В этом случае можно одновременно исследовать две цепи переменного тока или соопставлять изменения силы тока и напряжения в одной и той же цепи; например, можно наблюдать сдвиг фазы между  $I$  и  $V$  в цепи с емкостью или в цепи с самоиндукцией, и т. д.

На рис. 25 изображен двухшлейфовый осциллограф, выпускаемый нашей промышленностью для демонстрационных целей. Имеется много систем инерционных осциллографов; на их рассмотрении мы здесь не останавливаемся.

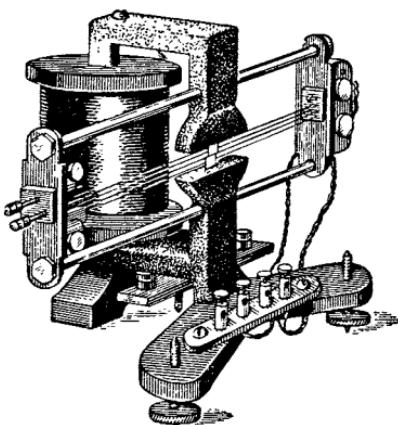


Рис. 25.

### III. АВТОКОЛЕБАНИЯ

Колебательные системы, в которых убыль энергии автоматически пополняется из какого-либо постоянного источника энергии, называются автоколебательными системами. В таких системах происходят незатухающие колебания. Приведем несколько примеров автоколебательных систем, действие которых легко демонстрировать на лекции: 1) часы; идущие за счет закрученной пружины

или поднятой гири; 2) органная труба, звучащая за счет энергии струи воздуха, выходящей из баллона или меха; 3) электрический звонок или электрокамертон, работающий за счет энергии источника постоянного тока; 4) скрипичная струна, звучащая при равномерном движении по ней смычки, и т. д.

Рассмотрим подробнее несколько более сложных опытов, демонстрирующих принцип действия автоколебательной системы.

### 19. Незатухающие колебания цилиндрической спиральной пружины

Цилиндрическая спиральная пружина  $A$ , оттянутая небольшим грузом  $\Gamma$ , подвешивается на нити, переброшенной через блок. Второй конец нити соединяется с якорем электромагнита, укрепленного в верхней части металлического штатива  $B$  (рис. 26). При включении тока в обмотку электромагнита якорь притягивается к сердечнику, и нить, на которой висит пружина, поддергивается вверх. При каждом поддергивании нити восполняется убыль энергии, теряемой при колебаниях пружины с грузом. Если включение тока в обмотку электромагнита будет производиться автоматически самой системой, то колебания пружины перестанут затухать, система начнет совершать незатухающие колебания (автоколебательная система).

Рассмотрим, как осуществляется в этом приборе пополнение энергии из внешнего источника, как действует «обратная связь».

Груз  $\Gamma$  при своем движении вниз давит на гибкую пластину  $D$  и заставляет стержень  $E$ , прикрепленный к концу пластины, периодически опускаться в сосуд  $\mathcal{X}$ , наполненный ртутью. При опускании стержня  $E$  в ртуть электрическая цепь замыкается и якорь электромагнита подтягивает цилиндрическую спираль. При движении груза вверх электрическая цепь разрывается.

Для осуществления этой схемы необходимо надлежащим образом подвести электрический ток к прибору. Один полюс источника тока соединяется с металлической

пластиной, заложенной в дне сосуда  $\mathcal{K}$ ; второй полюс присоединяется к одному из выводов обмотки электромагнита (рис. 26). Следует помнить, что сосуд  $\mathcal{K}$  электрически изолирован от металлического штатива  $B$ . Зато гибкая металлическая пластина  $D$  и второй вывод обмотки электромагнита прочно прикрепляются к штативу  $B$  так, чтобы обеспечить хороший электрический контакт между соединяемыми частями. При такой схеме включения каждое погружение стержня  $E$  в ртуть вызывает замыкание электрической цепи. Частота разрывов в цепи равна собственной частоте колеблющейся системы. Следовательно, пружина с грузом будет совершать незатухающие продольные колебания при автоматическом восполнении убыли энергии, затрачиваемой на преодоление трения, из аккумуляторной батареи, питающей обмотку электромагнита.

*Практические указания.*

1) Спираль прибора изготавливается из стальной проволоки. Примерные размеры спирали: диаметр отдельного звена пружины 15 м.м., длина нерастянутой

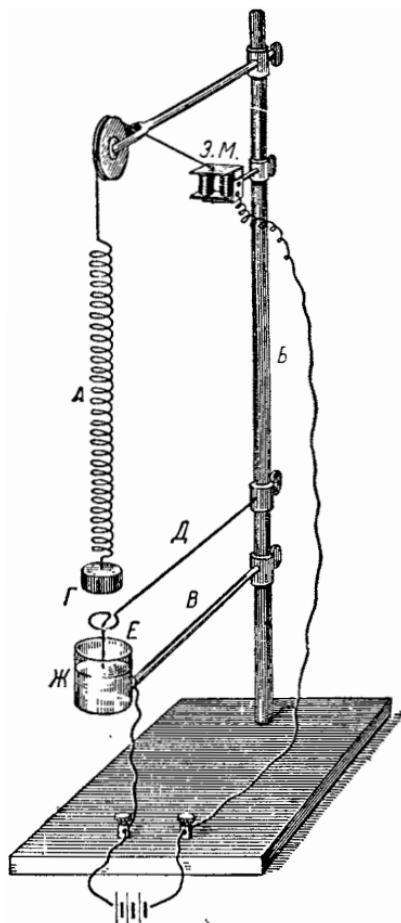


Рис. 26.

грузом пружины 350 м.м., число витков всей пружины 110.

2) Весь прибор монтируется на прочном металлическом штативе  $B$ , длина которого составляет примерно 750 м.м.

3) Сосуд *Ж*, наполняемый ртутью, рекомендуется изготовить из эbonита; если сосуд изготовлен из металла, то он должен быть электрически изолирован от штатива.

4) Упругая пластина *Д* и стержень *В*, несущий сосуд *Ж*, можно передвигать вдоль штатива. Крепление их на штативе осуществляется с помощью боковых винтов (см. рис. 26). При этих условиях удобно подбирать необходимую глубину погружения конца стержня *Е* в ртуть при максимальном опускании груза *Г*. Глубина погружения стержня *Е* в ртуть не должна быть больше 1—2 м.м.

5) Электромагнит в описываемом приборе выполнен в виде двух стержневых электромагнитов, обмотки которых соединены между собой последовательно. Сердечники электромагнитов в нижней части соединены между собой железной пластинкой. Эта соединительная пластина прикрепляется в свою очередь к общему штативу *Б*. Сопротивление обмоток электромагнита примерно 18 о.м. Сила тока, пропускаемая по обмотке,  $\approx 1$  а.

Якорь электромагнита представляет собой небольшую железную пластинку, укрепленную на оси и поднимающуюся только вверх на 1—1,5 см до упора. Для регулировки электромагнитного прерывателя его якорь можно оттягивать небольшим грузиком (на рис. 26 не показан).

Очевидно, что это примитивное реле можно сконструировать более совершенно.

6) Для того чтобы конец стержня *Е* не обгорал в момент разрыва электрической цепи, на поверхность ртути наливают небольшой слой (12—15 м.м) спирта или керосина. Пластина *Д* необходимо так отрегулировать, чтобы при выходе конца стержня *Е* из ртути он не выходил из слоя спирта или керосина.

7) Для начального возбуждения пружины груз оттягивается вниз настолько, чтобы произвести первое погружение конца стержня *Е* в ртуть и тем самым произвести первое замыкание цепи. Далее система входит самостоятельно в автоколебательный режим.

## 20. Спираль с током

Прибор представляет собой легкую цилиндрическую спираль, подвешенную вертикально (рис. 27), по виткам которой пропускается постоянный электрический ток. Вследствие магнитного взаимодействия витков спирали между собой вся спираль несколько укорачивается. Если отрегулировать подачу тока таким образом, чтобы в момент сокращения спирали ток выключался, то легко получить автоколебательную систему, совершающую незатухающие колебания за счет энергии постоянного тока. Для этой цели конец спирали погружается в чашку с ртутью, установленную тут же на деревянной подставке прибора. К ртути подводится один из полюсов источника постоянного тока, второй полюс источника подводится к верхнему концу спирали через металлический опорный стержень *А* (рис. 27). В момент сокращения спирали нижний конец ее выходит из ртути, и электрическая цепь прерывается.

*Практические указания.* 1) В целях облегчения колебательной системы спираль изготавливается из алюминиевой проволоки. В этом случае даже при относительно малых токах, идущих по спирали, удается вызывать значительное взаимное притяжение витков спирали.

2) Примерные размеры алюминиевой спирали: диаметр витка 35 *мм*, длина не растянутой грузом спирали 180 *мм*, число витков 65, диаметр проволоки 1,5 *мм*.

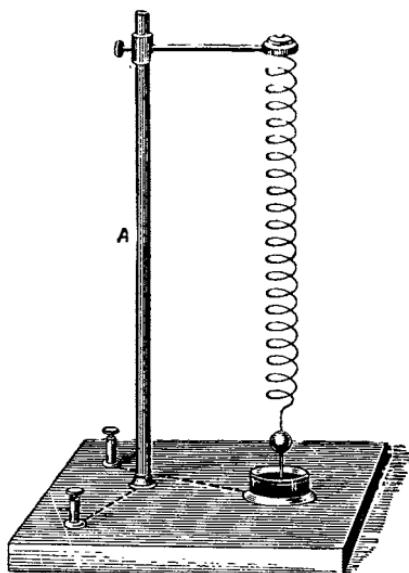


Рис. 27.

3) Спираль нагружается небольшим металлическим шариком, снабженным маленьким стерженьком. Этот стерженек осуществляет соединение электрической цепи при погружении в ртуть и разрыв цепи при выходе из ртути \*).

4) Железная чашка, наполненная ртутью, может выниматься из металлической оправы, с которой она имеет хороший электрический контакт. К этой оправе присоединяется одна из клемм прибора (вторая клемма присоединена к металлической стойке *A* прибора, рис. 28). Возможность вынимать чашку из оправы упрощает наливание и выливание ртути.

5) Когда прибор не демонстрируется, следует предохранить спираль от ненужного провисания (спираль сравнительно мягка). Для этого надо подхватить ее снизу деревянной подставкой и несколько сжать. В таком виде прибор хранится в шкафу.

## 21. Колебания «сброса»

Среди многих видов автоколебаний следует отметить колебания, характеризующиеся тем, что в системе периодически накапливаются какие-то напряжения (механические или электрические), которые через некоторое время быстро исчезают или заметно ослабевают. Подобные колебания принято называть колебаниями «сброса», разрывными или релаксационными колебаниями. Они встречаются довольно часто в природе и имеют существенное значение в технике. Приведем несколько примеров.

**Релаксационные колебания уровня воды в сосуде.** В боковые стенки стеклянного сосуда (рис. 28) впаяны две трубки; первая трубка, *a*, имеет сравнительно большое сечение (диаметр  $\approx 2$  см), а вторая, *b*, — малое сече-

\*) Следует помнить, что со ртутью необходимо обращаться весьма осторожно, не допуская разливания ее по столу и полу аудитории или препараторской. Несобранная ртуть испаряется и длительное время присутствует в воздухе. При значительном загрязнении воздуха физического кабинета парами ртути возможно отравление работающего там персонала. В целях предосторожности рекомендуется все операции со ртутью производить над плоским широким сосудом (стеклянным или железным). В этом случае прошитая ртуть легко собирается.

ние (диаметр  $\approx 0,8$  см). Первая трубка является сифоном: короткое колено этого сифона входит внутрь сосуда и достигает дна, длинное же колено расположено вне сосуда. Через трубку малого сечения в сосуд подается вода из водопровода; количество воды, поступающей из водопровода в сосуд, можно регулировать краном.

Откроем кран. Вода, наполняя сосуд, дойдет лишь до места соединения трубки *a* с сосудом.

Дальнейшее наполнение сосуда водой прекратится, так как трубка *a* наполнится водой и превратится в сифон, через который вся вода выльется из сосуда. Так как сечение трубки *a* значительно больше сечения трубки *b*, то сосуд почти полностью опорожняется от воды, несмотря на непрекращающуюся подачу воды из водопровода. В результате действия сифона вода из сосуда вы-

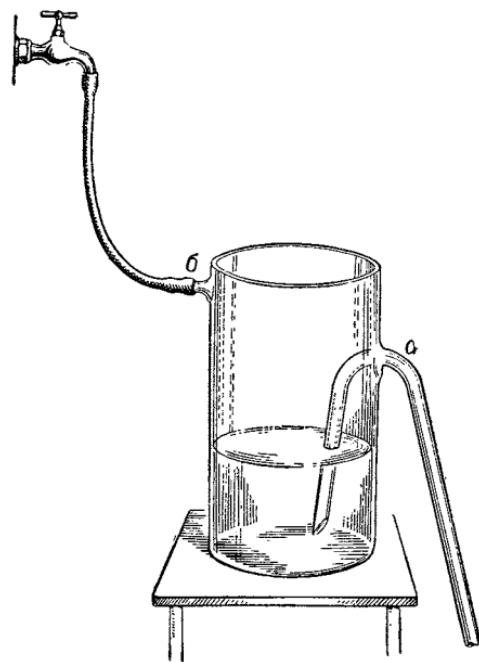


Рис. 28.

льется, водяной столб в трубке *a* разорвется, и сифон перестанет работать. После этого явление будет повторяться снова: сосуд будет наполняться до того момента, когда заполнится водой трубка *a*, затем произойдет очередной сброс воды и т. д. Период этого процесса будет постоянен, если давление воды в водопроводной сети не будет изменяться. Продолжительность этих сбросовых колебаний можно изменять, регулируя водопроводным краном скорость подачи воды в сосуд или же уменьшая емкость сосуда внесением внутрь его каких-либо тел.

Работа такого сифона наглядно демонстрирует релаксационные колебания уровня воды в сосуде. Колебания уровня воды в этой примитивной модели происходят за счет энергии воды, притекающей из водопровода.

**Релаксационные колебания маятника.** Мотор постоянного тока  $M$  приводит в равномерное вращение деревян-

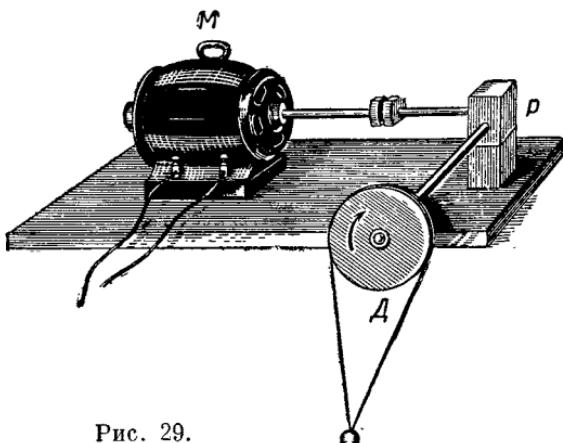


Рис. 29.

ный диск  $D$ , охваченный бечевкой в виде петли. Петлю оттягивает книзу небольшой груз (рис. 29). Вследствие трения петля увлекается диском и груз несколько поднимается вверх. На определенной высоте момент силы, созданный поднятым грузом, превысит трение, и груз упадет, совершая при этом движение в сторону, противоположную направлению вращения диска. Дойдя до крайнего положения, упавший груз начнет двигаться в направлении вращения диска и вновь будет поднят диском на некоторую высоту. При равномерном вращении мотора груз будет периодически (сравнительно медленно) подниматься вверх, а затем резко срываться вниз. Эти колебания груза следует отнести к релаксационному типу колебаний.

Колебания такого маятника будут несколько несимметричны относительно вертикали, проходящей через ось шкива. Изменение направления вращения мотора вызовет те же релаксационные колебания груза, но с асимметрией по другую сторону вертикали.

В данном опыте колеблющийся шарик берет энергию от равномерно вращающегося мотора.

*Практические указания.* 1) При постановке этого опыта деревянный диск должен вращаться сравнительно медленно (80—100 об/мин), поэтому рекомендуется между мотором и диском расположить редуктор  $P$  (рис. 29).

Мощность мотора невелика, примерно 150—200 вт.

2) Диаметр шкива около 15 см; длина петли 30—35 см. Для устранения сползания бечевки рекомендуется взять шкив с желобом.

## 22. Возбуждение натянутой резины равномерным потоком воздуха

Тонкая резиновая трубка длиной 3—3,5 м натягивается между двумя штативами (рис. 30). Если вблизи одного из концов резины продувать довольно сильный поток воздуха, то при определенном натяжении вся

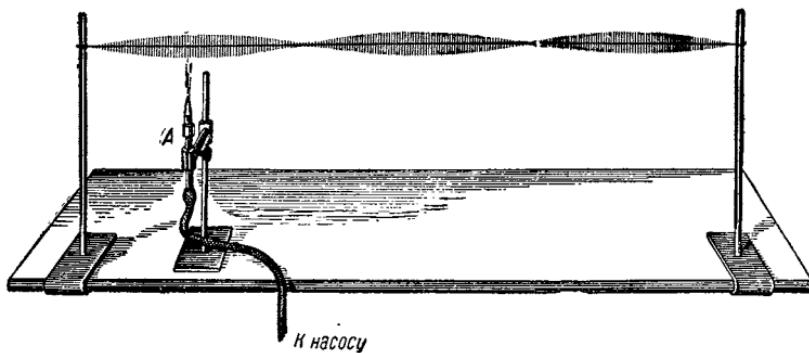


Рис. 30.

резина придет в колебательное движение и на ней установится целое число стоячих полуволн. Подобное колебание следует отнести также к разряду автоколебательных явлений \*).

\* ) См. статью С. П. Стрелкова «Опыт колебания шарового маятника в потоке воздуха», Журнал технической физики, т. IX, вып. 17, 1939.

Поток воздуха в этом опыте продувается от небольшого нагнетательного насоса лабораторного типа. Для этой цели выхлопной конец насоса соединяется со стеклянной трубкой *A* с помощью резинового шланга. Закрепив вертикально в штативе стеклянную трубку *A*, располагают ее под натянутой резиной, примерно под тем местом, где предполагается получить пучность колебаний (рис. 30). Для облегчения возбуждения резины потоком воздуха и для получения на ней определенного числа полуволн рекомендуется пальпем коснуться на несколько секунд резины в том месте, где должен установиться узел.

Если коснуться середины резиновой трубки, мы облегчим возникновение на ней колебаний, соответствующих первому обертону системы. При касании пальцем резины на расстоянии одной трети длины от одного из концов на резине устанавливаются три полуволны, соответствующие второму обертону для натянутой резины, и т. д. После того как возникнут колебания, картина деления резиновой трубки на полуволны будет устойчивой.

Для лучшей видимости желательно возбужденную резину осветить вдоль ее длины параллельным пучком света от проекционного фонаря или дать теневую проекцию резины на экране.

Для постановки этого опыта следует взять резиновую трубку диаметром 5—6 м.м. Натяжение этой трубки не должно быть сильным; степень натяжения подбирается каждый раз при налаживании опыта. Конец стеклянной трубки *A* необходимо несколько оттянуть примерно до диаметра 2—3 м.м. Поток воздуха должен быть стабильным во времени.

### 23. Термомеханические автоколебательные системы

Термомеханическими, или термоакустическими, системами называются такие системы, убыль энергии в которых при колебаниях пополняется от какого-либо источника тепла \*). С подобными колебательными системами

\*) См. Теодорчик К. Ф., Автоколебательные системы, Гостехиздат, 1952; Теодорчик К. Ф., Термомеханические автоколебательные системы, «Радиотехника», № 6, 1937.

мы встречаемся при рассмотрении многих конструкций термоэлектрических регуляторов, реле и т. д. Приведем несколько демонстраций, иллюстрирующих этот круг вопросов.

**Звучащая нагретая пластина.** Латунная массивная пластина *A* фигурного сечения, снабженная железной рукояткой, прогревается в пламени газовой горелки до температуры примерно  $250-300^{\circ}$  С. Затем пластина

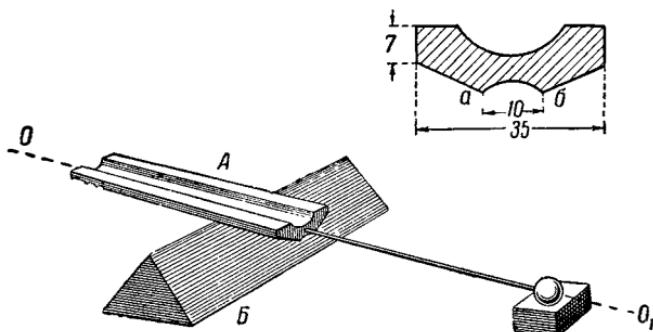


Рис. 31.

кладется на свинцовую призму *B* так, чтобы острые выступы пластины *a* и *b* коснулись ребра призмы (рис. 31; в верхней части рисунка изображено сечение пластины).

Если расположить нагретую латунную пластину на призме так, как показано на рис. 31, то пластина начнет колебаться около оси  $OO_1$ , издавая при этом довольно высокий звук. Причину этого явления следует искать в следующем: если допустить, что в начальный момент латунная пластина сильнее нагревает свинец у точки *a*, чем у точки *b*, то в этом месте свинец вследствие плохой теплопроводности будет больше расширяться, чем в других местах, и вследствие этого несколько приподниматься. Под влиянием этого подъема латунная пластина чуть-чуть повернется. Теперь лучший тепловой контакт между латунью и свинцом будет в точке *b*, что приведет к повороту пластины в другую сторону. В результате такого неравномерного прогревания свинца

латунная пластина, как мы уже отмечали, будет колебаться и звучать в течение нескольких минут. При уменьшении разности температур между пластиной и свинцом до  $70-80^\circ$  колебания пластины прекратятся.

Такой прибор является примером термомеханической автоколебательной системы.

*Практические указания.* 1) Латунная пластина имеет длину примерно 130—140 мм; размеры сечения пластины (в мм) указаны на рис. 31.

2) Перед тем как класть нагретую пластину на свинец, необходимо убедиться в том, что температура пластины меньше температуры плавления свинца, т. е. меньше  $327^\circ$ . Для этого рекомендуется слегка коснуться нагретой пластиной ребра призмы у ее края.

3) Верхнее ребро свинцовой призмы должно быть острым. Для этого рекомендуется перед опытом опилить грани призмы напильником или выравнить их при помощи ножа.

4) Колебания пластины наблюдаются тогда, когда она опирается о призму своей средней частью. Для нахождения этого положения рекомендуется медленно продвигать нагретую пластину *A* по призме, поворачивая ее при этом чуть-чуть вокруг оси *OO<sub>1</sub>*. Нахождение этого места проявится в звучании пластины.

5) Для усиления звучания нагретой пластины опыт можно производить на резонирующем ящике.

**Опыт А. С. Попова \*).** На цинковую пластинку кладется тонкий лист слюды. Нагретая в пламени газовой горелки изогнутая в дугу латунная полоска располагается на слюде так, чтобы середина дуги касалась слюды (рис. 32). Вследствие неравномерности в нагревании слюды и относительно плохой теплопроводности цинка латунная пластинка придет в колебательное движение за счет накопленной в ней тепловой энергии. Для начала колебания необходим начальный небольшой толчок. Этот толчок обычно возникает сам собою под влиянием неравномерного нагревания слюды.

\* См. Журнал Русского физико-химического общества, т. XXVI, часть физическая, 1894, стр. 331.

*Практические указания.* 1) Из латунного листа толщиной 2—3 мм вырезается полоса шириной 2—3 см. Полоска изгибается в полукольцо диаметром 15—16 см.

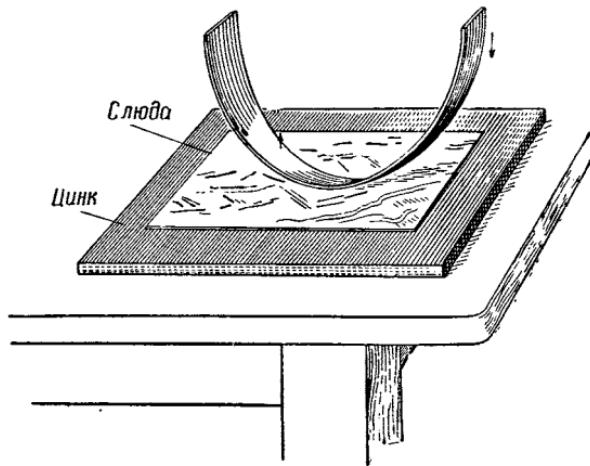


Рис. 32.

2) Лист слюды желательно взять довольно тонкий, площадью примерно 10 см × 10 см.

3) Цинковый лист имеет размеры 12 см × 18 см, толщина листа 2—5 мм.

## 24. Термоакустические колебания

**Опыт с газовой горелкой.** Если взять стеклянную или металлическую трубу, открытую с обоих концов, и надвинуть ее на пламя газовой горелки, то вдоль трубы возникнет поток воздуха. При определенных условиях поток воздуха в трубе начнет колебаться и издавать звук. Основной тон возникающего в трубе звука соответствует удвоенной длине трубы. Это акустическое явление относится к классу автоколебаний \*).

В целях подбора необходимого положения горелки в трубе звучит лишь при определенном положении

\*). См. литературу: У. Г. Брагг, Мир звука, ГИЗ, 1927; К. Ф. Теодорчик, Журнал технической физики, т. X, вып. 11, 1940.

горелки) в приборе, изготовленном в физическом кабинете МГУ, предусмотрена возможность поднимать и опускать металлический держатель горелки (рис. 33). Когда возникают колебания столба воздуха, пламя горелки начинает пульсировать. За этими изменениями формы пламени наблюдают через небольшое стекло *Б*, вделанное в нижнюю часть металлической трубы *А*.

Примерные размеры трубы: длина 1300 м.м., диаметр 80 м.м.

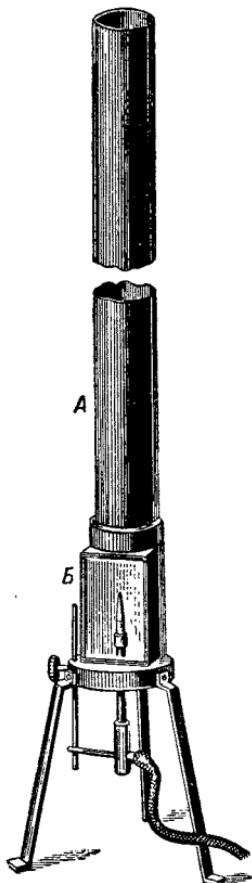


Рис. 33.

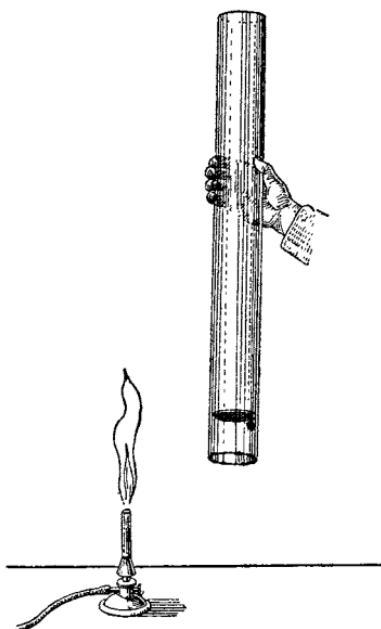


Рис. 34.

**Опыт с нагретой сеткой.** Внутрь стеклянной открытой с обоих концов цилиндрической трубы вставляется медная сетка. Сетка располагается на расстоянии 8—12 см от нижнего конца и держится внутри трубы на трении о стенки. При расположении трубы вертикально сетка не должна выпадать. Если сетку прогреть тем или

иным способом докрасна (см. ниже), а затем трубу расположить вертикально, то столб воздуха в трубе нагревается от сетки и труба начинает звучать. Звучание продолжается две-три минуты. Тон звука, издаваемого трубой, будет понижаться по мере остывания сетки. При горизонтальном расположении трубы вертикальный поток воздуха исчезает и труба перестает звучать. Возвращение трубы в вертикальное положение вызывает вновь звучание трубы.

Пользуясь этими демонстрациями, можно объяснить гудение в трубах, шипение в котлах, звучание накипи в чайниках и самоварах и т. д.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры трубы: длина 150 см, диаметр 5—7 см. Сетка, вводимая в трубу, должна быть довольно массивной. Вместо сетки внутрь трубы можно ввести комок тонкой медной проволоки.

2) Прогрев сетки производится на газовой горелке. При этой операции трубу располагают вертикально над горелкой, а затем медленно надвигают ее на пламя горелки (рис. 34). Надо стараться не прогревать при этом стенки трубы.

Если сетке придать форму спирали, натянутой на каркас из изоляционного материала, то нагрев сетки в трубе можно производить электрическим током.

## 25. Термомеханическая модель незатухающих колебаний

Термомеханические незатухающие колебания можно демонстрировать на приборе, предложенном проф. К. Ф. Теодорчиком. Прибор имеет следующее устройство (рис. 35): металлический стержень *А* с небольшим грузом *Б* укреплен на оси *О*. Стержень в средней части скреплен с двумя мягкими спиральными пружинами, оттягивающими его по горизонтали. Правая спиральная пружина крепится жестко к внутренней стенке деревянной рамы, на которой смонтирован весь прибор, а левая пружина соединена с тонкой никромовой проволочкой *аб*, протянутой вдоль другой внутренней стенки деревянной рамы.

При отклонении маятника в сторону стержень приходит в колебательное движение с частотой, определяемой его моментом инерции и упругими свойствами горизонтальных пружин. Разумеется, при этих условиях колебания маятника будут затухающими. Для превращения этих колебаний в незатухающие необходимо никромовую нить накаливать электрическим током, прерывая его с частотой колебаний маятника. Это сделать нетрудно.

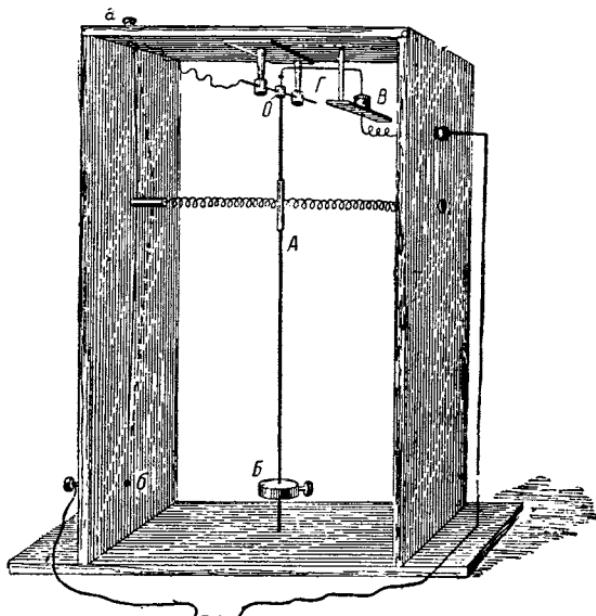


Рис. 35.

Верхний конец маятника  $A$  скрепляется с изогнутой стальной проволокой  $\Gamma$ , свободный конец которой погружается в ртуть, налитую в железную чашку  $B$  (рис. 35). Электрическая цепь в этом случае должна проходить через контакт ртуть — стальная проволока. При включении тока проволочки  $ab$  нагревается и удлиняется. Это вызывает оттягивание маятника  $A$  в большей степени правой пружиной, чем левой, в результате чего стержень  $A$  отклоняется в сторону и стальная проволока  $\Gamma$  выходит из ртути, разрывая тем самым электрическую

цепь. Разрыв цепи вызывает охлаждение нити *аб* и замыкание электрической цепи, что ведет к повторению всего процесса. Описанный температурный регулятор делает колебания маятника *А* незатухающими. Энергия для поддержания колебательного процесса поступает из электрической батареи.

Этот прибор может служить наглядной моделью лампового генератора, совершающего незатухающие колебания.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры маятника: длина 25—30 см, диаметр 5 мм. На расстоянии 6—8 см от верхнего конца маятника проходит его ось. В целях уменьшения трения ось маятника укреплена на конусах; в свою очередь конуса закреплены в скобах, которые привернуты к крышке деревянной рамы (см. рис. 35). Для изменения периода колебания системы маятник снабжен передвигающимся грузом *Б*. Вес груза примерно 30—50 г.

2) Пружины, оттягивающие маятник *А*, изготовлены из стальной проволоки диаметром 0,2 мм; диаметр отдельного звена пружины примерно 8 мм. Длина пружины 30—40 мм.

3) Нить *аб* изготовлена из никромовой проволоки диаметром 0,2 мм. Длина нити 300—350 мм. В верхней части прибора укрепляется винт, с помощью которого можно изменять натяжение нити.

4) Через нить пропускается ток порядка 1—2 а. К прибору рекомендуется подводить минимальное напряжение с целью уменьшить искрение при разрыве контакта ртуть — стальная проволока.

#### IV. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕВАНИЯ

Колебания, возникающие под действием внешней периодической силы, называются вынужденными. Амплитуда вынужденных колебаний становится максимальной в том случае, когда частота внешней силы близка к собственной частоте возбуждаемой системы. Техника дает весьма много примеров вынужденных колебаний. Приведем ряд опытов, демонстрирующих этот вид колебаний.

## 26. Вынужденные колебания маятников

На нитях разной длины подвешиваются к раме несколько одинаковых грузов (металлические шарики). Два из них подвешиваются на нитях одинаковой длины. Отклонив один из этих маятников, наблюдают постепенное раскачивание остальных маятников. В наиболее сильное колебание придет маятник, имеющий длину, равную длине первоначально отклоненного маятника. Для большей наглядности этого явления рекомендуется маятники одинаковой длины укрепить на перекладине рамы не рядом, а на некотором расстоянии так, чтобы между ними расположились еще маятники как с большей, так и с меньшей длиной подвеса.

• Прибор, на котором воспроизводится этот простой опыт, имеет самые различные конструктивные оформления. На рассмотрении их мы не останавливаемся.

## 27. Колебания фундамента двигателя

Известно, что при работе двигателя вся масса двигателя и фундамента, на который он опирается, приходит в колебательное движение. При совпадении частоты вращения двигателя с собственной частотой всего сооружения фундамент двигателя может настолько сильно раскачаться, что его колебания повлекут за собой нарушение нормальной работы механизма, а в особо неблагоприятном случае приведут к аварии. С подобными резонансными явлениями приходится сталкиваться в строительном деле, в машиностроении и т. д. Иллюстрацией к сказанному является следующая демонстрация.

На небольшом подъемном столе укрепляется мотор постоянного тока  $M$  (рис. 36). При медленном увеличении числа его оборотов легко попасть в резонанс с собственной частотой колебаний нагруженного мотором стола. Весь стол вместе с прикрепленным к нему мотором придет в колебательное движение. Об этом легко судить по дребезжанию крышки стола и по сползанию мелких предметов, специально положенных для этой цели на крышку.

Для увеличения вибрации мотора на оси его несимметрично укрепляется небольшая пластина *A*. При дальнейшем увеличении числа оборотов система выйдет из состояния резонанса, и стол перестанет колебаться.

Опыт становится более наглядным, если укрепить на столе небольшие тиски и зажать в них три тонкие сталь-

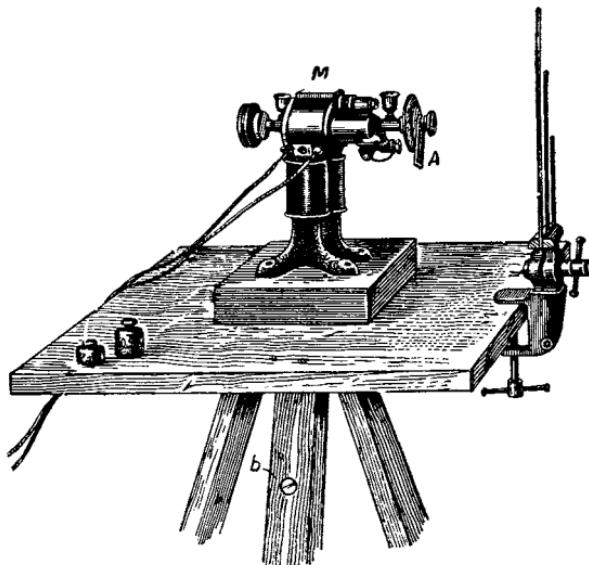


Рис. 36.

ные пластины (пружины) разной длины (рис. 36). Если теперь повторить этот опыт сначала, то при определенном числе оборотов мотора придет в колебательное движение самая длинная пластина; при дальнейшем увеличении числа оборотов длинная пластина остановится, а начнет колебаться пластина средних размеров, и, наконец, при относительно большом числе оборотов мотора будет колебаться вместе со столом только самая короткая пластина. При теневом проектировании всех трех пластин на экран эти последовательно сменяющие друг друга колебания будут отчетливо заметны. Если начать медленно уменьшать число оборотов мотора, то колебания пластин повторятся в обратном порядке.

*Практические указания.* 1) Опыт удобно ставить на небольшом подъемном столике. Примерные размеры столика: площадь крышки  $50\text{ см} \times 50\text{ см}$ , допускаемая высота подъема крышки столика  $50-75\text{ см}$ . Столик закрепляется в любом положении с помощью бокового винта *B* (см. рис. 36).

2) Мотор прикрепляется к крышке стола болтами или струбцинками. Для этого опыта применяется мотор мощностью  $\approx 0,25\text{ квт}$ . Необходимо поставить в цепь мотора реостат, обеспечивающий плавное изменение числа оборотов.

3). Пластины-вибраторы изготавливаются из стали и имеют примерно следующие размеры: толщина  $0,5\text{ мм}$ , длина  $30\text{ см}$ ,  $20\text{ см}$  и  $15\text{ см}$ .

4) Размеры латунной планки *A*:  $0,3\text{ см} \times 4\text{ см} \times 12\text{ см}$ . Планка насаживается на ось мотора эксцентрично, так, что один конец планки отстоит от оси на расстоянии, примерно втрое большем, чем другой конец.

## 28. Гироскоп с резонаторами

Опыт механического резонанса можно показать на приборе, известном под названием «гироскоп с резонаторами». Этот прибор в отличие от обычного гироскопа снабжен несколькими стальными пластинками (резонаторами), обладающими различными собственными частотами. Все резонаторы прикреплены к одной общей колодке, которая в свою очередь прижата винтами к опорному кольцу *A* (рис. 37). Внутри этого кольца в центрах вращается диск гироскопа *B*. Если привести во вращательное движение диск *B*, то вследствие неизбежных толчков диска при его вращении резонаторы, прикрепленные к кольцу, придут последовательно друг за другом в колебательное движение. При больших скоростях вращения диска в колебательное движение приходит самый короткий вибратор, а затем по мере уменьшения частоты вращения диска раскачиваются более длинные резонаторы \*).

\*). Для усиления этих толчков в диске гироскопа просверливается с одной стороны небольшое углубление, создающее некоторую асимметрию диска относительно оси.

*Практические указания.* 1) Диск гироскопа приводится во вращение с помощью бечевки (см. демонстрацию «Магнитный волчок» — «Лекционные демонстрации по физике», выпуск 3, стр. 63).

2) При малых размерах гироскопа с резонаторами следует при демонстрации пользоваться теневой проекцией. Пучок света имеет направление, указанное на рис. 37 стрелками. На экране необходимо добиться резкого изображения верхних концов вибраторов, изогнутых под прямым углом.

3) Гироскоп с вибраторами, выпускаемый Главучтехпромом Министерства просвещения РСФСР, имеет следующие размеры: диаметр диска гироскопа 60 *мм*; внешний диаметр кольца 90 *мм*. Собственная частота самого короткого вибратора 2500—3000 колебаний в минуту, а самого длинного вибратора 1200—1500 колебаний в минуту.

## 29. Вращательный маятник

Вращательный маятник (рис. 38) состоит в основном из довольно массивного медного колеса *A*, насанженного на ось прибора, и плоской спиральной пружины *B*. Эта пружина одним концом скреплена с небольшим цилиндром, сидящим на оси прибора, другим концом связана с коротким плечом рычага *B*, с помощью которого осуществляется внешнее периодическое воздействие на вращательный маятник (см. ниже). Если отклонить маятник на небольшой угол, а затем отпустить, то медное колесо придет в колебательное движение, частота которого, как известно,

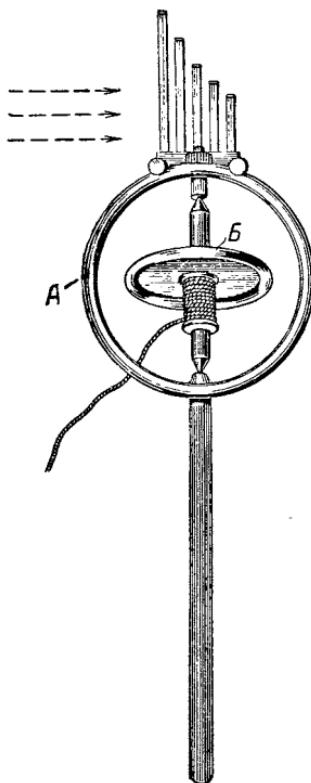


Рис. 37.

определяется моментом инерции колеса и упругими свойствами пружины. Колебания маятника в этом случае будут затухающими.

На таком вращательном маятнике легко демонстрировать основные явления, возникающие при вынужденных колебаниях системы.

Рассмотрим прибор подробнее. Внешнее периодическое воздействие на пружину *Б* и тем самым на медный

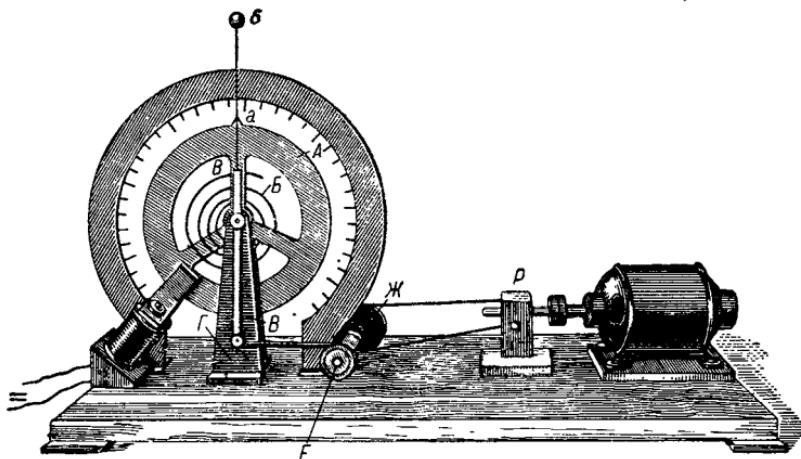


Рис. 38.

диск маятника производится с помощью рычага *B*, длинное плечо которого соединено с кривошипным механизмом *E*. Движение кривошипа *E* связано с вращением шкива *Ж*, который через небольшой редуктор *P* соединен с мотором постоянного тока. Следовательно, при вращении мотора спиральная пружина испытывает периодическое воздействие короткого конца рычага *B*. Число оборотов мотора плавно регулируется реостатом в цепи якоря (см. ниже). Следует помнить, что медное колесо приобретает частоту внешнего воздействия не сразу, а через несколько секунд (переходный период). Поэтому изменение скорости вращения мотора следует производить медленно. Для удобства наблюдения в большой аудитории за колебательным движением маятника *A* и рычага *B*, осуществляющего внешнее воздействие на

маятник, прибор снабжен двумя указателями: первый указатель, *a*, связан непосредственно с колесом *A*, второй, *b*, — с верхним концом рычага *B* (рис. 38). Для отсчета амплитуды колебаний в приборе предусмотрена круглая шкала, на фоне которой двигаются указатели. Степень затухания колебаний нашей системы можно регулировать с помощью тока, пропускаемого по обмотке электромагнита, между полюсами которого двигается медное колесо (рис. 38).

Опыты с вращательным маятником производятся в такой последовательности.

а) Демонстрация собственных колебаний маятника и измерение с помощью секундомера периода собственных колебаний. Оценка степени затухания колебаний маятника.

б) Демонстрация собственных колебаний маятника при значительных затуханиях. Для этого в цепь электромагнита включается постоянный электрический ток. Сила тока оценивается демонстрационным амперметром. Эти опыты довольно просты и не требуют особых пояснений.

в) Демонстрация вынужденных колебаний системы.

Для этого маятник *A* останавливается и включается мотор постоянного тока. Опыт начинается с малых оборотов мотора, число их в секунду должно быть меньше собственной частоты колебаний медного кольца. Маятник под действием толкающих усилий рычага придет в колебательное движение с частотой, равной частоте внешней силы. Амплитуда вынужденных колебаний маятника будет невелика: 2—3 деления шкалы. При увеличении скорости вращения мотора амплитуда навязанных маятнику колебаний будет нарастать. При приближении частоты внешней силы к собственной частоте маятника (резонансная частота) произойдет явление резонанса, которое проявится в максимальных угловых отклонениях вращательного маятника. Указатель *a* на медном кольце описывает при резонансе дугу, почти равную  $\frac{3}{4}$  длины окружности. Дальнейшее увеличение частоты вращения мотора нарушит явление резонанса, и колебания медного колеса будут вновь происходить в пределах нескольких делений шкалы.

При уменьшении числа оборотов явления повторятся в обратном порядке.

При демонстрации вынужденных колебаний следует обратить внимание аудитории на сдвиг фаз между внешней силой и смещениями колеблющегося колеса. При частотах внешнего воздействия, много меньших чем собственная частота маятника, сдвиг фазы между системами не будет наблюдаться. Движение обоих указателей происходит согласованно. При резонансе сдвиг фаз достигает  $90^\circ$ . Это легко уловить по движению указателей. Так, например, если один из указателей, например *a*, проходит нулевое положение, то второй, *b*, отмечающий фазу внешнего воздействия, находится в одном из крайних положений. Когда частота внешней силы много больше, чем собственная частота маятника, то указатели *a* и *b* проходят положение равновесия одновременно, двигаясь каждый раз в противоположных направлениях. Такое передвижение указателей характеризует сдвиг фаз, равный  $180^\circ$ .

г) В заключение демонстрации следует показать вынужденные колебания маятника при значительном затухании. На разборе этого опыта мы не останавливаемся.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры медного кольца: внешний диаметр 200 *м.м.*, внутренний диаметр 140 *м.м.* толщина кольца 2 *м.м.* Плоская пружина имеет четыре-пять витков, радиус наибольшего витка 50—70 *м.м.* Такие пружины применяются в часах-будильниках.

2) Ось маятника лежит в металлической скобе *Г* и крепится в ней с помощью конусов с контргайками. Скоба своим основанием прикрепляется к массивной деревянной доске. На этой доске располагаются остальные детали прибора.

3) Собственные колебания медного колеса должны быть достаточно свободными. При отклонении его на небольшой угол маятник должен дать по крайней мере 8—10 полных колебаний.

4) Для удобства наблюдения за движениями двух указателей им придается различный внешний вид; например, один указатель имеет на конце шарик, другой — острие.

5) Подковообразный электромагнит, тормозящий движение медного колеса, располагается несколько наклонно к основанию прибора (см. рис. 38). На выступающие концы сердечника электромагнита надеваются два полюсных наконечника, расстояние между которыми можно регулировать.

6) Частота вращения оси редуктора изменяется в пределах  $\frac{1}{3}$  — 3 оборота в секунду. Собственный период колебаний маятника приблизительно 2 сек.

7) Опыт демонстрируется в теневой проекции. Необходимо получить на экране резкий теневой рисунок всего прибора.

### 30. Вынужденные колебания цилиндрической пружины с грузом

С помощью устройства, осуществляющего внешнее воздействие при демонстрации вращательного маятника (см. предыдущую демонстрацию), т. е. мотора, редуктора и кривошипа можно показать еще один вариант демонстрации вынужденных колебаний. На высоком, вертикально установленном штативе укрепляется блок. Через блок перебрасывается прочная нить, один конец которой прикрепляется к выступающему концу кривошипа (в точке  $E$ ), а другой конец скрепляется со стальной цилиндрической



Рис. 39.

пружиной, оттягиваемой небольшим грузом (рис. 39). Собственная частота системы спираль — груз подбирается такой, чтобы она оказалась примерно в середине того

частотного диапазона, который можно получить с помощью мотора, снабженного редуктором. Постепенно увеличивая число оборотов мотора, можно создать поддергивание нити, на которой висит спираль, с частотой, равной собственной частоте системы пружина—груз. В этом случае амплитуда раскачиваемого груза будет максимальной. Если экспериментатору удается добиться полного резонанса между внешней силой и раскачиваемой системой, то размахи груза, висящего на пружине, будут настолько велики, что пружина получит заметную остаточную деформацию. О появлении остаточной деформации можно судить, сравнивая положения груза, висящего на пружине, до начала опыта и после него по отношению к поверхности демонстрационного стола.

Этот вариант опыта можно поставить и более простыми средствами. На рассмотрении их мы не останавливаемся.

### 31. Качающиеся часы

Небольшие часы-будильник, подвешенные так, как это показано на рис. 40, представляют по отношению к

опоре физический маятник. Если частота колебаний балансира часов (механизма часов) близка к собственной частоте такого физического маятника, то под действием систематических толчков балансира весь корпус часов может притти в колебательное движение.

На лекции этот опыт ставится таким образом: у будильника снимается чашка звонка, а вместо нее к корпусу часов прикрепляется небольшой стержень *A* (рис. 40). На этот стержень насаживается небольшая призма *B*, закрепляемая на

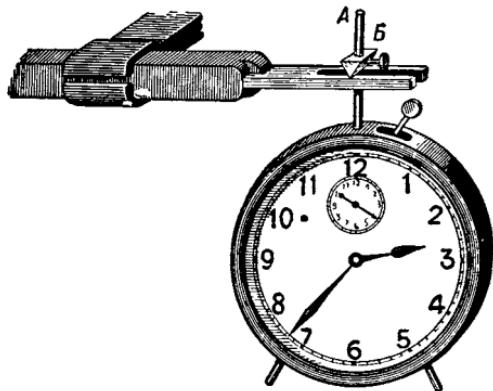


Рис. 40.

стержень снимается чашка звонка, а вместо нее к корпусу часов прикрепляется небольшой стержень *A* (рис. 40). На этот стержень насаживается небольшая призма *B*, закрепляемая на

подобранный высоте с помощью бокового винта. Часы с заденной пружиной располагаются так, чтобы ребро призмы опиралось на плоскую, горизонтально расположенную стальную пластину. Если экспериментатору удалось подобрать условия, о которых упомянуто выше, то часы, установленные на призме, придут в колебательное движение и будут колебаться относительно опоры до тех пор, пока полностью не раскрутится пружина механизма (сутки и более). Для удобства демонстрирования этого опыта в большой аудитории рекомендуется на стержень *A* насадить соломинку или тонкую бумажную трубку.

Опыт следует демонстрировать в теневой проекции.

### 32. Частотомеры

**Демонстрационный частотомер.** Прибор для определения частоты переменного тока называется частотомером. Действие частотомера основано на возникновении вынужденных колебаний стальных пружин прибора при приближении к ним электромагнита, обмотка которого питается переменным током. Демонстрация работы этого прибора хорошо иллюстрирует вынужденные колебания механической системы под действием переменного магнитного поля.

Демонстрационный частотомер представляет собой набор тонких плоских ферромагнитных пружин различной толщины и ширины, расположенных в один ряд. Нижние концы всех пружин прочно прикреплены к общей подставке (рис. 41). Пружины так подобраны, что каждая имеет свою резко выраженную собственную частоту колебаний \*). Шкала прибора, помещенная над пластинами, указывает значения этих частот (80, 90, 100 гц и т. д.). Если электромагнит, обмотка которого питается переменным током измеряемой частоты, медленно продвигать вдоль ряда пружин (рис. 41), то сильнее всего раскачается

\*) Напаяв различные грузы на пружины, можно значительно изменять собственные частоты резонаторов. Этим приемом обычно пользуются при изготовлении частотомера.

та пружина, собственная частота которой равняется удвоенной частоте переменного тока. Для усиления действия электромагнита на пружины частотомера верхний полюс сердечника изогнут и обращен в сторону пружин. При включении в обмотку электромагнита 50-периодного переменного тока в наиболее сильное колебание, сопровож-

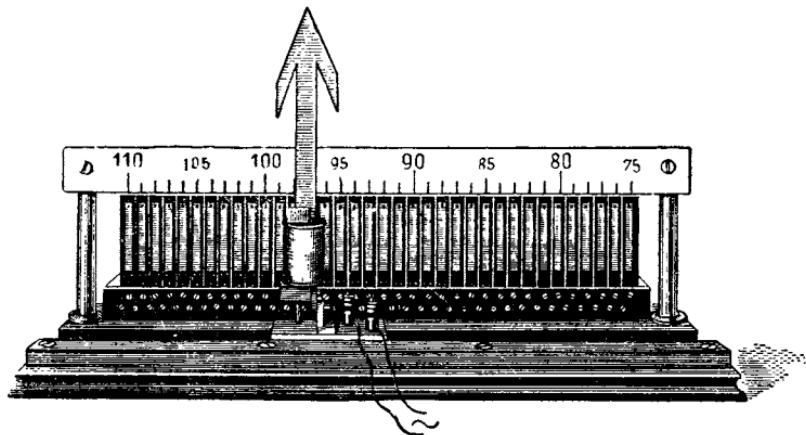


Рис. 41.

даемое хорошо слышимым низким тоном, придет пружина, собственная частота которой равняется 100 гц. Это явление обычно и демонстрируется на лекции.

Демонстрационный частотомер имеет примерно 35 пружин, собственные частоты которых лежат в пределах от 75 до 110 гц. Обмотка электромагнита частотомера рассчитывается на непосредственное включение ее в цепь переменного тока с напряжением 120 или 220 в.

**Технический частотомер.** Частотомеры, применяемые в лабораторной и заводской практике, устроены несколько иначе \*). Набор стальных вибраторов (язычков), настроенных на определенные частоты, охватывается изогнутой железной полосой *A*, которая прочно соединена с железным сердечником электромагнита *M* (рис. 42). При вклю-

\*) О вибрационных частотомерах см. в книге «Электрические и магнитные измерения» под редакцией Е. Г. Пономарева, ОГИЗ, Л.—М., 1937.

чении переменного тока измеряемой частоты в обмотку  $M$  все стальные вибраторы прибора одновременно подвергаются воздействию переменного магнитного потока. Однако из всех язычков в наиболее интенсивное колебание придет лишь тот, собственная частота которого равняется удвоенной частоте переменного тока, питающего обмотку.

Технический частотомер имеет небольшие размеры и пользоваться им непосредственно при демонстрациях неудобно. Поэтому рекомендуется шкалу частотомера и весь набор его вибраторов спроектировать на экран. Можно воспользоваться для этой цели эпидиаскопом. При этих условиях можно показать в аудитории ряд опытов.

а) Демонстрация действия технического частотомера. В цепь переменного 50-периодного тока включается частотомер. Через несколько секунд в вынужденное колебание приходит один вибратор, возле которого стоит цифра 50 \*). Необходимо пояснить, что частотомеры, употребляемые в измерительной технике, в отличие от демонстрационных частотомеров указывают непосредственно частоту переменного тока в герцах (герцметры).

Следует обратить внимание аудитории на то, что в момент включения тока в прибор (неустановившийся режим) раскачиваются одновременно несколько вибраторов, примерно до шести штук; они расположены по обеим сторонам от вибратора, настроенного в резонанс с частотой включаемого в прибор переменного тока. Только через несколько секунд после включения тока устанавливается колебание лишь одного определенного вибратора. В равной степени в момент выключения тока в небольшое

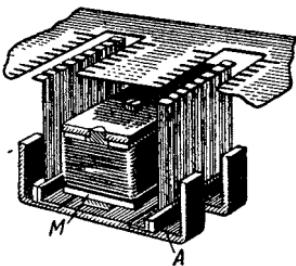


Рис. 42.

\*) Частота переменного тока в сети может немного изменяться во времени. В этом случае в колебательное движение приходит не центральный вибратор частотомера (50 гц), а один из соседних с ним.

движение придут те же вибраторы, которые колебались при включении тока.

Показав включение частотомера в цепь 50-периодного тока, подаем на его клеммы переменное напряжение от такого генератора, чтобы частоту можно было менять примерно от 40 до 60 гц\*). Медленно и плавно увеличиваем частоту переменного тока генератора. Изменение частоты тока вызовет поочередное колебание всех вибраторов прибора, начиная от вибраторов, настроенных на низкие частоты, до вибраторов с относительно большой собственной частотой. При уменьшении частоты переменного тока, подаваемого на частотомер, явление повторится в обратном порядке.

В качестве генератора может быть использована динамомашина переменного тока небольшой мощности или звуковой генератор, соединенный с ламповым усилителем, повышающим напряжение генератора до 100—120 в. Необходимо, чтобы ток, подаваемый на прибор, менялся плавно по частоте, но был бы в то же время относительно постоянен по своему максимальному напряжению. Лабораторные частотомеры обычно изготавливаются для непосредственного включения их в цепь с напряжением 120 или 220 в.

б) Модуляция колебаний. Изменение амплитуды колебаний во времени носит название амплитудной модуляции. Любое изменение амплитуды колебания во времени вызывает появление в нем новых частот и тем самым нарушает монохроматичность этого колебания (см. ниже демонстрацию «Модуляция звуковой волны»).

Для демонстрации этого явления поступают таким образом: переменный 50-периодный ток, подаваемый на технический частотомер, прерывается несколько (примерно шесть) раз в секунду. Это прерывание равноценно модулированию переменного тока от максимума до нуля и от нуля до максимума. В этом случае частотомер обнаружит не только колебания вибратора, собственная частота которого равняется 100 колебаниям в секунду,

---

\*) Интервал частот, на который обычно изготавливаются лабораторного типа частотомеры, примерно 44—56 гц.

но и колебания вибраторов, настроенных на 94 и 106 гц. Более высокие гармоники трудно наблюдать этим способом.

Прерывать ток 2—3 раза в секунду можно простым замыканием от руки телеграфного ключа, включенного в цепь, однако при этом трудно добиться постоянства числа разрывов тока во времени. Удобнее операции прерывания тока производить с помощью какого-нибудь

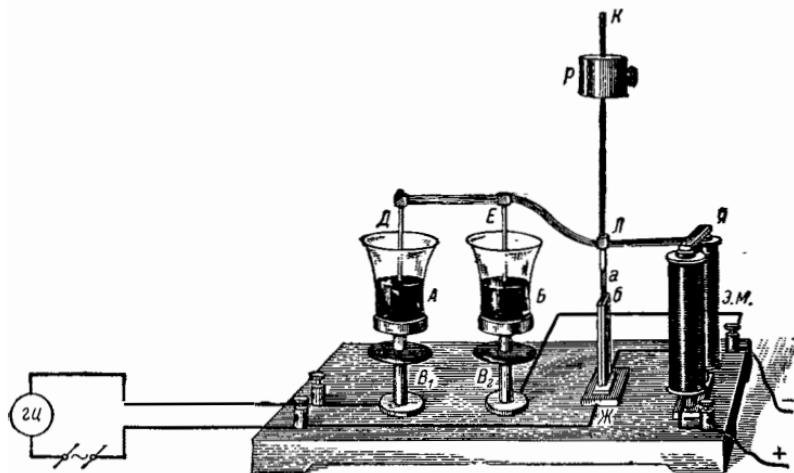


Рис. 43.

прерывателя. Предлагается для этой цели электромагнитный прерыватель с двумя ртутными контактами (рис. 43), которым можно воспользоваться, кстати сказать, и в ряде других случаев. Первый ртутный контакт находится в цепи обмотки электромагнита Э. М. (сосуд *B*), второй ртутный контакт — в цепи переменного тока, подаваемого на частотомер (сосуд *A*). Электромагнитный прерыватель состоит из подковообразного электромагнита Э. М. и маятника КЛ, соединенного с двумя стержнями *D* и *E* и якорем *Я*. Маятник колеблется на тонкой стальной пружине *ab* и тем самым строго периодически подымает из ртути, налитой в сосуды *A* и *B*, контактирующие стержни *D* и *E*. При каждом подъеме стержней цепь переменного и постоянного токов разрывается.

Поскольку пепель постоянного и переменного токов на небольшом участке проходит по металлической подставке  $\mathcal{K}$ , пружине  $ab$  и левой ветви самого маятника (рис. 43), то крепление всех частей прибора должно обеспечивать хороший электрический контакт.

Винты  $B_1$  и  $B_2$  предназначены для подъема и опускания дна в каждом из сосудов прерывателя. Этим способом легко можно отрегулировать необходимую глубину погружения стержней  $D$  и  $E$  в ртуть.

Частота колебания прерывателя регулируется передвижением груза  $P$  по стержню маятника. С помощью такого прерывателя можно варьировать частоту разрывов цепи переменного тока в довольно больших пределах.

### 33. Вынужденные колебания струны

**Первый вариант опыта.** Тонкая бечевка или струна прикрепляется одним концом к устойчивому штативу, а другим — к ножке камертона с электромагнитным возбуж-

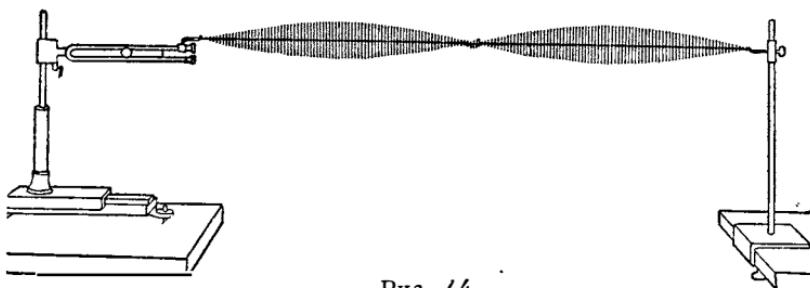


Рис. 44.

дением (рис. 44). Камертон располагается так, что его колебания перпендикулярны к длине натянутой нити. Включив ток в обмотку электромагнита и возбудив колебания камертона, мы медленно отодвигаем штатив, в котором закреплен камертон, и изменяем тем самым натяжение бечевки, а значит, и ее собственные частоты. При совпадении одной из собственных частот натянутой бечевки с частотой колебаний камертона вся бечевка придет в

интенсивное поперечное колебание; вдоль длины бечевки уложится целое число полуволн.

Опыт следует начать с возбуждения бечевки на основном тоне. В этом случае установится одна полуволна, и вся бечевка будет описывать фигуру, напоминающую веретено. Незначительное ослабление натяжения прекращает колебания бечевки. При дальнейшем уменьшении натяжения вновь возникнут колебания, но в этом случае резонанс произойдет на второй гармонике; теперь на растянутой нити установятся две полуволны.

Следует показать, что если коснуться рукой или палкой узла смещения, который в этом варианте опыта располагается на середине бечевки, то картина распределения смещения по длине не нарушится; если коснуться другой точки бечевки (например, пучности смещения), то колебания бечевки изменяются. Уменьшая постепенно натяжение, можно получить до десяти и более полуволн.

Опыт можно повторить в обратном порядке, увеличивая натяжение нити. Натяжение нити можно регулировать рукой.

*Практические указания.* 1) Для этого опыта следует взять тонкую крученыую бечевку диаметром 1—1,5 мм, длиной 150—180 см.

2) Для того чтобы в большой аудитории были лучше видны колебания бечевки, рекомендуется расположить бечевку на фоне черной материи и всю нить осветить параллельным пучком света от проекционного фонаря; луч света посыпается в этом случае примерно под углом 5—10° к длине бечевки. Нить перед демонстрацией следует протереть мелом.

3) Конец бечевки крепится не непосредственно к ветви камертона, а к концу металлической насадки, расположенной на одной из ветвей камертона (рис. 44).

4) Электромагнит, вызывающий вибрацию камертона, располагается между ветвями камертона ближе к стеблю, примерно на расстоянии одной трети длины ветви.

5) Колебания бечевки следует показать также в стробоскопическом освещении (см. демонстрацию «Струя в стробоскопическом освещении» — «Лекционные демонстрации по физике», выпуск 2). Если частота мигающего света

равна или кратна частоте камертона, то размытость бечевки исчезнет, и нить будет резко проектироваться на экран в виде синусоиды. Изогнутость колеблющейся нити свидетельствует о том, что соседние полуволны, образовавшиеся по длине нити, находятся в противофазе. Число изогнутых участков соответствует числу полуволн, установленных на нити в момент наблюдения.

При постановке этого варианта опыта необходимо предварительно получить на экране теневой рисунок ветвей камертона. В этом случае подбор частоты вращения диска стробоскопа удобно производить, следя за колебаниями концов камертона на экране. Следует обратить внимание аудитории на то, что ветви камертона колеблются в противоположных фазах.

6) Можно получить на бечевке поперечные стоячие волны, возбуждая ее не поперечными вибрациями ветвей камертона по отношению к бечевке, а продольными. Для этого необходимо камертон расположить так, чтобы его колебания происходили вдоль длины бечевки. В этом случае камертон будет периодически изменять натяжение бечевки. Если это будет происходить с частотой, в два раза большей, чем собственная частота закрепленной бечевки, то бечевка придет в колебательное движение, и на ней установится целое число поперечных полуволн.

Такое возбуждение бечевки следует назвать параметрическим (см. подробнее о параметрическом резонансе в следующей главе).

**Второй вариант опыта.** Если пропустить переменный ток по натянутому проводнику (струне), то при воздействии постоянного магнитного поля, направленного перпендикулярно к проводнику, последний приходит в вынужденное колебание. Вынужденные колебания струны будут наиболее интенсивными тогда, когда одна из собственных частот натянутого проводника совпадет с частотой протекающего по нему переменного тока.

Этот опыт ставится таким образом (рис. 45). Проволока длиной 1,5—3 м закрепляется одним концом в штативе; другой ее конец перебрасывается через блок, закрепленный в держателе второго штатива. Свисающий конец

проводолки оттягивается чашкой с грузами. К концам растянутой проволоки подводится переменный 50-периодный ток. У одного из концов проволоки располагается электромагнит, обмотка которого питается постоянным током \*). При определенном натяжении проволока приходит в колебательное движение. (Разумеется, легче возбудить колебания, если электромагнит помещен в средней части проводника, но при этом электромагнит загораживает от зрителей значительную, и притом центральную, часть колеблющегося проводника.)

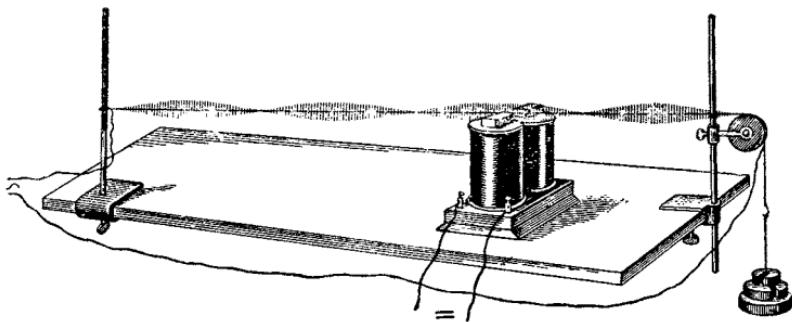


Рис. 45.

Как известно, собственная частота струны зависит от степени ее натяжения, от линейной плотности и длины струны. Рекомендуется показать в аудитории влияние на возбуждение струны каждого из этих факторов в отдельности.

Для получения на струне стоячих волн различной длины удобнее всего изменять величину нагрузки. Этим способом можно возбудить в струне несколько обертонов. Амплитуда установившихся в проволоке стоячих волн при постоянстве других факторов (длина, натяжение и пр.) определяется величиной напряженности магнитного поля и силой тока, пропускаемого по проволоке. Эти величины регулируются с помощью реостатов, включенных в цепь проволоки и в цепь обмоток электромагнита (реостаты на рисунке не изображены).

\*) Можно поставить сильный постоянный магнит.

Для этого опыта нельзя брать ферромагнитную проволоку, так как такая проволока будет притягиваться к полюсам электромагнита и это может затруднить (а в некоторых случаях и прекратить) ее колебания.

С методической точки зрения полезно возбудить проволоку, пропуская по ней постоянный ток, а по обмотке электромагнита — переменный.

Предлагается такой вариант опыта. Сила постоянного тока в проволоке увеличивается настолько, чтобы проволока раскалилась докрасна. При соответствующем подборе оттягивающего груза раскаленная проволока начнет колебаться и на ней уложится определенное число полуволн. Однако теперь накал проволоки будет неравномерным: те части проволоки, где устанавливаются пучности колебаний, будут темными вследствие более интенсивного охлаждения их воздухом; те части проволоки, которые соответствуют узлам колебаний, будут попрежнему раскалены докрасна. Эта картина неравномерности нагрева проволоки током при ее поперечных колебаниях особенно наглядна в затемненной аудитории.

*Практические указания.* 1) Для этого опыта необходимо взять никромовую проволоку диаметром 0,3—0,5 мм, одинаковую по сечению и однородную по составу. При нагревании покоящейся проволоки степень каления проволоки по всей длине должна быть одинаковой. 2) Вследствие острого резонанса подход к нему следует производить весьма осторожно, нагружая чашку, оттягивающую нить, небольшими грузами.

## V. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС

Параметрическим возбуждением называется такой вид возбуждения колебаний, когда внешняя периодическая сила действует не непосредственно на движение системы, а только изменяет с определенной частотой один из параметров колебательной системы. Параметрические колебания довольно часто встречаются в технике \*). Круг

\*) См. статью Н. Д. Папалеки «Эволюция понятия резонанса», Успехи физических наук, т. XXXI, вып. 4, 1947.

вопросов, связанных с параметрическим резонансом, изучался у нас в Советском Союзе академиками Л. И. Мандельштамом, Н. Д. Папалекси и их учениками.

Приведем несколько опытов, демонстрирующих этот вид возбуждения системы или, иначе говоря, этот вид резонанса.

### 34. Параметрическое возбуждение простого маятника

**Первый вариант опыта.** Небольшой металлический шарик диаметром 2—3 см прикрепляется к тонкой нити длиной 1,5—2 м. Свободный конец нити перебрасывается через блок, укрепленный на высоком штативе (рис. 46). Если этот конец нити закрепить, а шарик отклонить в сторону, то последний будет колебаться с частотой, соответствующей длине подвеса, т. е. длине  $BB'$ . Колебания маятника будут в этом случае затухающими.

Иначе будет протекать явление, если экспериментатор строго периодически, с частотой, в два раза большей, чем собственная частота колебаний маятника, будет укорачивать подвес, поддергивая нить, на которой висит шарик. Это уменьшение длины подвеса необходимо производить в тот момент, когда шарик проходит положение равновесия; в моменты наибольшего отклонения шарика от положения равновесия надо удлинять подвес на ту же величину. При поддергивании шарика совершается положительная работа (система накапливает энергию); при

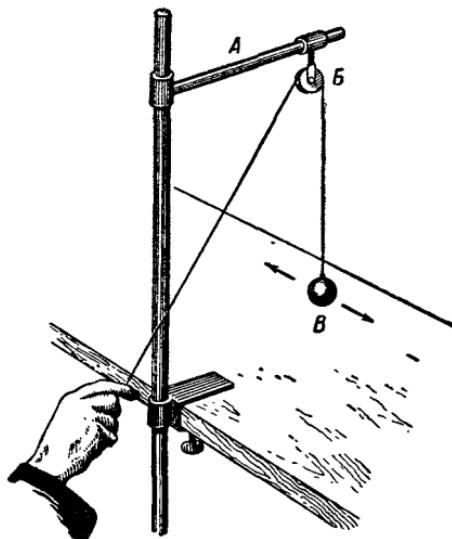


Рис. 46.

опускании шарика на то же расстояние система отдает энергию. Вследствие того что подъем шарика совершается при большем натяжении нити, первая работа будет больше второй. Если разность этих энергий больше потерь на трение, расходуемых шариком при колебаниях, то шарик будет накапливать энергию и амплитуда его колебаний будет увеличиваться. Воздействуя на систему таким образом, можно весьма сильно раскачать шарик, хотя при этом мы непосредственно не изменяем колебательного движения шарика.

Для проведения опыта высокий штатив укрепляется на демонстрационном столе. Держатель *A* штатива, несущий блок, располагается перпендикулярно к длине стола. Следовательно, шарик может колебаться вдоль длины стола.

Экспериментатор становится за штативом, держа в руке свободный конец нити. Каждый раз, когда шарик проходит положение равновесия, экспериментатор слегка поддергивает нить, а при максимальном отклонении шарика отпускает ее. При этой демонстрации существенно достичнуть равномерного опускания и поднятия руки в тakt с колебаниями шарика. Даже при сравнительно больших периодах колебания шарика операция поддергивания нити требует известного навыка от экспериментатора.

Для параметрического возбуждения необходимо, чтобы система в начале опыта обладала небольшой начальной энергией, т. е. шарик должен совершать небольшие начальные колебания.

**Второй вариант опыта.** В этом опыте, предложенном Рэлеем, периодически изменяется не длина маятника, а сила тяжести, действующая на маятник.

Для демонстрации удобно использовать длинный железный стержень, свободно качающийся около оси, проходящей через один из его концов (см. демонстрацию «Маятник в магнитном поле» — «Лекционные демонстрации по физике», выпуск 3). Под нижним концом стержня располагается электромагнит, дающий довольно сильное магнитное поле. Расстояние между концом железного стержня и выступающим концом сердечника электромагнита примерно

1—2 см. Обмотка электромагнита через реостат и ключ присоединяются к цепи постоянного тока.

Начиная опыт, немного отклоняя маятник. Затем включаем и выключаем ток в обмотке электромагнита с частотой, в два раза большей, чем собственная частота колебания маятника. Возникновение магнитного поля усиливает притяжение стержня книзу, что эквивалентно увеличению силы тяжести, действующей на шарик. Если возникновение магнитного поля будет происходить в строго определенные моменты времени, то маятник придет в состояние параметрического резонанса.

Этот опыт может служить также иллюстрацией вынужденных колебаний маятника.

Экспериментатор замыкает и размыкает цепь электромагнита от руки с помощью телеграфного ключа. Включение тока в обмотку удобнее производить в те моменты, когда маятник находится в крайних положениях. Если экспериментатор не успевает включить ток два раза за период, то включение тока можно производить лишь один раз.

### 35. Параметрическое возбуждение струны под действием протекающего по ней переменного тока

В главе «Вынужденные колебания» описан опыт возбуждения струны магнитным полем при пропускании по ней переменного тока (опыт «Вынужденные колебания струны», стр. 79). Если взять тонкую никромовую проволоку, то при достаточно сильном нагреве ее переменным током не будет надобности добавочно действовать на нее магнитным полем: проволока приходит в колебательное движение вследствие периодического (100 раз в секунду) изменения внутреннего натяжения, вызываемого колебаниями силы тока в проволоке. Таким образом, проволока, питаемая переменным током, может притти при определенном внешнем натяжении в состояние параметрического резонанса. Натяжение проволоки и подача тока к ней производятся точно так же, как и в опыте «Вынужденные колебания струны».

Установившиеся на проволоке стоячие волны наблюдаются в затемненной аудитории. Для этого необходимо проволоку прогреть током до красного каления.

Примерные условия постановки опыта: диаметр никромовой проволоки 0,5 *мм*, длина 250 *см*; груз, оттягивающий проволоку, 200—300 *Г*. Колебания, возникающие на проволоке, весьма чувствительны к внешнему постоянному натяжению, поэтому рекомендуется в этом опыте предусмотреть плавное изменение натяжения проволоки.

### 36. Маятник-качели

Наиболее убедительным примером параметрического возбуждения является раскачивание на качелях. Для демонстрации этого явления в физическом кабинете МГУ изготовлен специальный прибор \*) (рис. 47).

Металлический стержень *AB* вращается около оси *OO<sub>1</sub>*, проходящей через стержень на расстоянии примерно 20—25 *см* от его верхнего конца. Стержень весь изготовлен из малоуглеродистой стали, за исключением нижнего конца, который сделан из латуни; обе части прочно между собой сочленены в стержень одного диаметра. Нижняя часть железного стержня охватывается спиральной пружиной, на которой висит цилиндрическая катушка *Г*. Высоту крепления верхнего конца пружины можно изменять с помощью бокового винта *B*. Катушка располагается на такой высоте, чтобы нижний конец железной части стержня входил в канал катушки примерно на  $\frac{1}{2}$  ее длины. При таком расположении катушки она будет подниматься на 10—12 *см* вверх по железному стержню в момент включения тока в обмотку катушки и, естественно, падать при выключении. При подъеме катушки вверх момент инерции маятника относительно оси *OO<sub>1</sub>* убывает, при опускании катушки — возрастает.

Опыт начинается с того, что маятнику-качелям дают небольшое начальное отклонение. Затем периодически, с частотой в два раза большей собственной частоты маят-

\*) При конструировании этого прибора физический кабинет пользовался консультацией инж. М. В. Малинина.

ника, изменяют его момент инерции, включая и выключая телеграфным ключом ток в катушке; в результате маятник раскачается до значительных амплитуд. Подобное параметрическое возбуждение наблюдается, когда человек, периодически приседая и выпрямляясь, изменяет момент инерции качелей и тем самым сильно раскачивает всю систему.

*Практические указания.*

1) Длина железной части стержня 120 см; длина латунной части 20 см; диаметр стержней 1 см.

2) В целях уменьшения трения у места расположения оси в стержне сделано небольшое круглое расширение, куда запрессован шарикоподшипник.

3) Провода, подводящие ток к катушке  $\Gamma$ , лежат вдоль стержня маятника и поджимаются к клеммам, закрепленным на оси  $OO_1$  (одна из них изолирована от тела маятника). Монтаж проводится таким образом, чтобы провода не мешали колебаниям маятника (рис. 47).

4) К клеммам  $K$ , расположенным на оси, подается напряжение 20—24 в от источника постоянного тока. Большим напряжением для питания катушки лучше не пользоваться во избежание вредного искрения в ключе в момент разрыва цепи.

5) Примерные размеры катушки: длина 100 м.м., диаметр щек катушки 60 м.м., число витков 800; диаметр проволоки 0,5 м.м.

6) В целях уменьшения удара при падениях катушки  $\Gamma$  рекомендуется на конец стержня  $AB$  навернуть небольшой

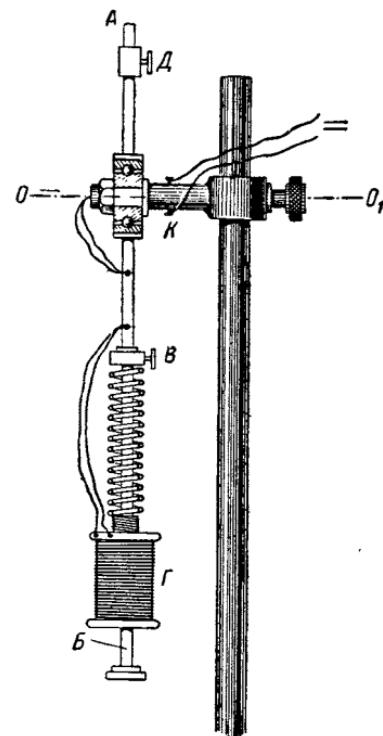


Рис. 47.

латунный диск, на который укладывается кусок губчатой резины или пробки в качестве демпфера.

7) Для увеличения собственного периода колебаний маятника к верхней части стержня, выше оси  $OO_1$ , прикрепляется груз  $D$  ( $0,5-1 \text{ кГ}$ ). Крепление груза к стержню производится боковым винтом (рис. 47). При большем периоде колебания маятника включение и выключение тока в обмотке катушки  $\Gamma$  можно производить от руки.

8) Ось маятника  $OO_1$  прочно закрепляется в массивном штативе, привертываемом к демонстрационному столу.

9) В приборе, изготовленном в физическом кабинете МГУ, предусмотрен скользящий контакт, который автоматически включает и выключает ток при колебаниях маятника. На описании этой детали мы не останавливаемся.

## VI. СЛОЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ ПО ОДНОЙ ПРЯМОЙ

### 37. Механическая модель сложения колебаний, направленных по одной прямой

Изложение вопроса о сложении колебаний, направленных по одной прямой, лекторы часто начинают с графических иллюстраций. Для этого на доске вычерчиваются две синусоиды, соответствующие изменению смещения точки во времени, участвующей одновременно в двух колебательных движениях. Складывая ординаты нарисованных синусоид, лектор получает график суммарного колебательного движения. При таком изложении может оказаться полезным прибор, который механически воспроизводит эту операцию сложения.

Прибор представляет собой деревянный щит с вертикальной задней стенкой, перед которой располагаются 50 довольно длинных деревянных стерженьков квадратного сечения ( $1 \text{ см} \times 1 \text{ см}$ ) (рис. 48). Каждый из стерженьков удерживается в вертикальном положении двумя металлическими держателями, прикрепленными к его задней

стороне снизу и сверху. На щите прибора имеются вертикальные прорезы (по числу стерженьков), вдоль которых могут скользить держатели стерженьков. Подобная конструкция дает возможность передвигаться стерженькам только вверх, если с нижнего конца они будут чем-то подталкиваться. Стерженьки в этом типе прибора взяты неодинаковой длины, так что верхние концы их грубо воспроизводят очертание синусоиды. Кроме того, по поверхности стерженьков, обращенной к зрителям, прове-

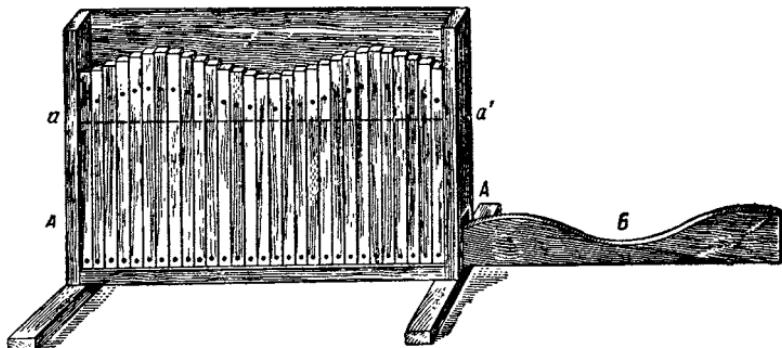


Рис. 48.

дена белой краской линия, параллельная основанию прибора (линия  $aa'$  на рис. 48).

Если пропустить через отверстие  $A$ , сделанное в каждой из вертикальных стоек штатива, тонкую деревянную доску-шаблон  $B$ , верхней стороне которой приданы очертания синусоиды (рис. 48), то все стерженьки поднимутся вверх, и их верхние концы изобразят другую линию, соответствующую сумме двух складываемых синусоид. В частном случае эта линия будет тоже синусоидой, если продвигаемый шаблон изображает синусоиду того же периода, каким обладает синусоида, образованная верхними концами стержней. Если продвигаемый синусоидальный шаблон расположится по отношению к синусоиде концов со сдвигом фаз, равным половине волны, то верхние концы стерженьков расположатся на одной прямой линии.

Следует обратить внимание аудитории на то, что белая прямая линия  $aa'$ , нанесенная по стерженькам

прибора, при вдвижении шаблона превращается в синусоиду, повторяющую очертания шаблона.

Полезно изготовить несколько деревянных шаблонов, имеющих очертания в виде синусоид с периодом, в 2—3 раза меньшим, чем начальная синусоида прибора. Следует иметь шаблоны равного периода, но разных амплитуд. При наличии такого набора шаблонов можно иллюстрировать большее число вариантов сложения колебаний, направленных по одной прямой. Сами деревянные шаблоны с разными периодами и амплитудами могут быть использованы на лекции и в других случаях, например, в качестве моделей поперечных волн.

*Некоторые данные прибора.* Размеры щита: 60 см  $\times$  75 см. Средняя длина стерженька 50 см. Нижние концы стерженьков слегка заострены. Это несколько облегчает продвижение синусоидальных шаблонов под нижними концами стерженьков.

### 38. Сложение двух колебаний, направленных по одной прямой, наблюдаемое с помощью двух электрокамертона

Для демонстрации этого опыта используется установка, описанная нами в опыте «Запись колебаний электрокамертона на экране», с добавлением к ней еще одного электрокамертона. Опыт следует ставить с камертонами разных частот. Второй камертон располагается после первого, до вращающегося зеркала. Оба камертона устанавливаются так, чтобы колебания ветвей камертона были вертикальны. Фокусирующая линза располагается между электрокамертонами (рис. 49).

Получив изображение отверстия диафрагмы на экране, приводим в колебательное движение первый электрокамертон. Вследствие этого светлое пятно на экране растягивается в вертикальную линию длиной примерно 20—25 см. Затем останавливаем первый электрокамертон и пускаем в ход второй. Желательно добиться на экране того же смещения светлого пятна по вертикали, которое наблюдалось и с первым электрокамертоном. Наконец, возбуждаем одновременно оба электрокамертона. Далее

приводим во вращение многогранную призму с рядом плоских зеркал — вращающееся зеркало. С его помощью получаем на экране сначала график смещения во времени ветвей первого камертонов, затем отдельно график смещения второго камертонов. Наконец, демонстрируем суммарную картину смещения светового пятна.

Далее следует перейти к демонстрации сложения колебаний на камертонах одного периода.

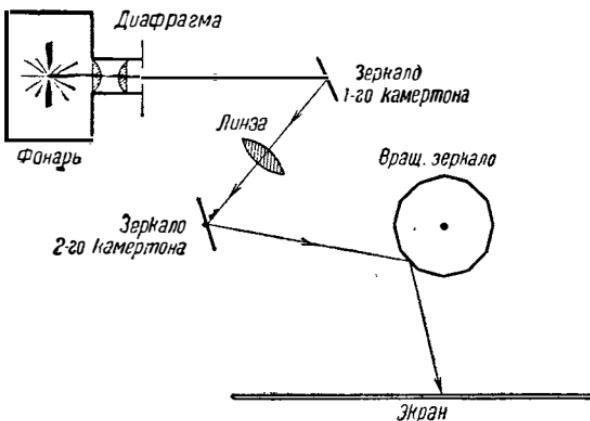


Рис. 49.

Следует заметить, что подобрать два камертонов одной частоты практически почти невозможно, вследствие этого синусоида от первого камертонов будет несколько сдвинута относительно синусоиды второго камертонов. Внешне этот сдвиг проявится в виде возникновения на экране биений амплитуды. В целях некоторого устранения этого недостатка рекомендуется подогнать по частоте демонстрационные электрокамертоновы. Эта операция производится путем медленного передвижения небольшой металлической насадки вдоль одной из ветвей электрокамертонов. Изменить частоту электрокамертонов в весьма небольших пределах можно также плавным изменением (с помощью регулировочного винта) частоты прерываний тока в обмотке электромагнита. В обоих этих случаях подгонку частот камертонов производим в аудитории, следя все время за получаемой на экране картиной сложения колебаний.

### 39. Сложение двух колебаний, направленных по одной прямой, наблюдаемое на электронном осциллографе

Для демонстрации на электронном осциллографе явления сложения двух колебаний, направленных по одной прямой, собирают схему, изображенную на рис. 50.

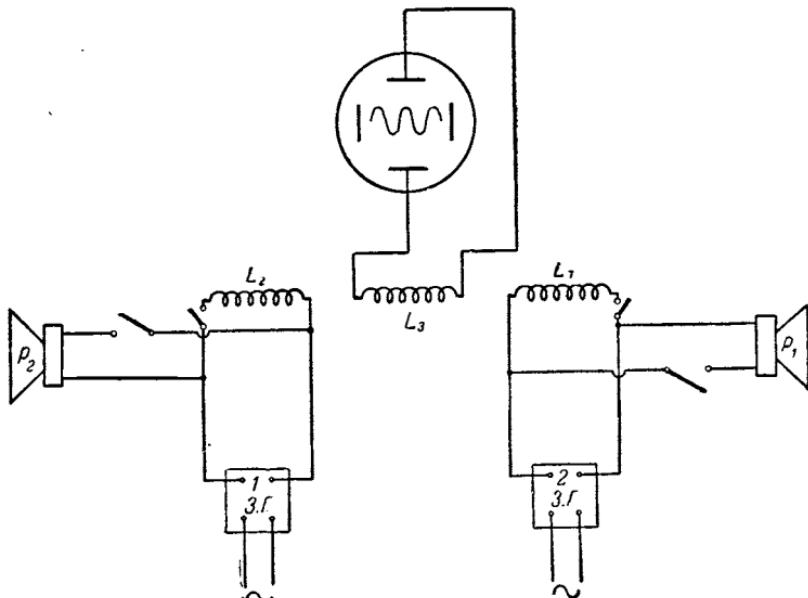


Рис. 50.

Опыт следует начать с демонстрации сложения двух колебаний одной частоты. Чтобы получить от двух звуковых генераторов переменные токи одного периода, необходимо включить в схему два репродуктора (рис. 50) и методом биений добиться звучания их в унисон (см. ниже демонстрацию «Биения»). После этого выключают репродукторы и к одному из звуковых генераторов, например первому, присоединяют катушку  $L_1$ . Так как катушка  $L_1$  индуктивно связана с катушкой  $L_3$ , концы которой поданы на вертикально отклоняющие пластины электронного осциллографа, то в третьей катушке возникает переменная электродвижущая сила, которая растянет светлое

пятно на экране в вертикальную полоску. Рекомендуется это растяжение довести до  $1/3$  диаметра экрана, используя усилители низкой частоты электронного осциллографа. Затем отсоединяется катушка  $L_1$ , ко второму звуковому генератору приключается катушка  $L_2$  и полностью повторяется рассмотренная выше операция. Далее, включают обе катушки и наблюдают одновременное воздействие двух переменных электродвижущих сил одной частоты на электронный пучок. Для рассмотрения суммарного колебательного движения во времени необходимо включить генератор горизонтальной развертки с частотой примерно 60—100 гц (см. демонстрацию «Наблюдение колебаний электронного пучка»). Усилитель, связанный с генератором развертки, дает возможность растянуть суммарную синусоиду по горизонтали экрана осциллографа.

Опыт следует повторить снова, складывая теперь две переменные электродвижущие силы разных частот. Обязателен опыт сложения двух напряжений, незначительно отличающихся друг от друга по частоте. В этом случае на экране будет получена характерная картина биения колебаний.

В качестве индукционных катушек можно взять многослойные сотовые катушки, установленные в тройном держателе. В конструкции держателя следует предусмотреть возможность значительно изменять расстояние между средней и крайними катушками схемы.

## VII. СЛОЖЕНИЕ ДВУХ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

### 40. Опыт с шаром, подвешенным на бечевке

Деревянный шар диаметром около 10 см подвешивается на длинной тонкой стальной проволоке или прочной бечевке к потолку аудитории. Шар отклоняется в сторону на 1—1,5 м. Зрители несколько секунд наблюдают за этими колебаниями. Затем лектор ударяет деревянным молотком (киянкой) колеблющийся шар, заставляя его колебаться еще в другой плоскости, перпендикулярной

к первой. В зависимости от того, в какой фазе колебания шара нанесен ему удар в перпендикулярном направлении, путь, описываемый шаром в итоге сложения колебаний, будет различен: прямая линия, круг или эллипс. Направление движения шара по этому пути также зависит от фазы.

Опыт требует некоторой тренировки от демонстратора, особенно когда удар наносится шару при прохождении им положения равновесия. Рекомендуется взять нить такой длины, чтобы шар висел примерно на уровне глаза экспериментатора. В этом случае удобно точно наносить удар шару. Начальное отклонение шара лучше вызывать также ударом молотка. В этом случае импульсы, даваемые шару в двух взаимно перпендикулярных направлениях, легче подобрать равными. Во всех вариантах опыта шару наносится киянкой центральный удар.

Желательно продемонстрировать в аудитории все наиболее типичные случаи сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний.

#### 41. Запись взаимно перпендикулярных колебаний на маятнике с песком

Опыт сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний можно показать на маятнике с песком, — прибор, рассмотренный выше в демонстрации «Маятник с песком». Для постановки опыта необходимо вызвать колебания воронки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Для этого достаточно охватить нити подвеса воронки небольшой петлей (колечком). В этом случае маятник несколько поднимается вверх (пунктир на рис. 14). Теперь маятник может колебаться как в плоскости, проходящей через вертикальную и горизонтальную части штатива (около точек *a* и *b*), так и в плоскости, перпендикулярной к первой (около точки *c*, см. рис. 14). Очевидно, что при такой постановке опыта периоды колебаний будут разные. Период первых колебаний будет больше периода вторых.

Опыт следует начать с отношения частот 1 : 2. Для этого необходимо передвигать колечко *c* по подвесам до тех пор, пока более частые колебания воронки не будут

в точности иметь период, в два раза меньший, чем период колебания воронки в перпендикулярной плоскости. Спределение периодов колебаний маятника следует произвести перед опытом с помощью секундомера. После этого следует наполнить воронку песком, отклонить ее несколько в сторону и дать начальный толчок. В зависимости от направления этого толчка воронка в своем движении опишет ту или иную фигуру. При начальном толчке воронки в направлении, совпадающем с плоскостью штатива, высыпающийся песок опишет восьмерку. При начальном толчке воронки через положение равновесия воронка опишет параболу и т. д.

Для того чтобы картина, получаемая на картоне, не «смазывалась» повторными движениями воронки, следует насыпать в воронку столько песка, чтобы его хватило лишь на один цикл движений. Можно сделать иначе: задержать колеблющуюся воронку и отвести ее в сторону после того, как на картоне получилась одна из желаемых фигур. Следует воронку подвесить к штативу на такой высоте, чтобы лист картона оказался на 10—12 см ниже конца воронки. Эта мера также способствует четкости получаемого рисунка. Песок можно окрасить (фуксином, анилиновыми красками или просто чернилами).

Передвигая колечко *в* по подвесу маятника, следует получить другое соотношение периодов колебания воронки в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и вновь повторить опыт в этих новых условиях.

## 42. Проектирование взаимно перпендикулярных колебаний на экран с помощью двух освещенных щелей

Следует отметить, что приборов для демонстрации сложения взаимно перпендикулярных колебаний разработано довольно много. Объем книги не дает возможности рассмотреть все типы таких приборов. Ограничимся описанием лишь одного прибора, который наиболее прост в изготовлении и при этом, как нам кажется, достаточно нагляден.

К массивной металлической подставке со скошенными краями прикрепляются под углом  $90^\circ$  стальные плоские пружины (рис. 51). Собственные частоты этих пружин одинаковы. К концу каждой пружины прикрепляется, перпендикулярно к ее плоскости, металлический диск.

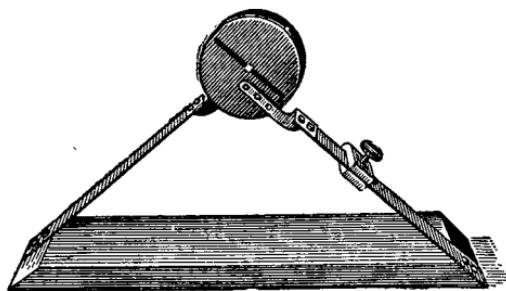


Рис. 51.

По одному из диаметров первого и второго дисков прорезаны щели, расположенные также под прямым углом друг к другу. Если смотреть на прибор со стороны длинной стороны его основания (рис. 51), то зрителю увидит один лишь пе-

редний диск, так как этот диск полностью закрывает задний; щели, нанесенные на дисках, вследствие такого расположения превратятся в одно маленькое квадратное отверстие со стороной, равной ширине щели. Из описания и рассмотрения рисунка прибора можно понять, что при колебаниях пружины друг друга не касаются.

Опыт сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний на этом приборе ставится таким образом. Прибор располагается перед конденсором проекционного фонаря; с помощью объектива плоскость диска проектируется на экран. На экране будет виден светлый квадрат на темном фоне. Теперь отклоним на небольшой угол одну из пружин и дадим ей возможность свободно колебаться. На экране появится светлая полоса \*), расположенная под углом  $45^\circ$  к горизонту. Остановим первую пружину и приведем в колебательное движение вторую пружину. Теперь

\*) Светлая полоса слегка изогнута, так как конец пружины при своих колебаниях движется по кривой линии. Вследствие малости угла склонения пружины криволинейность светлых полос на экране не заметна.

будет проектироваться на экране светлая полоса, расположенная под углом  $90^\circ$  к первой. При одновременном отклонении пружин в одну сторону, например вниз, на экране будет видна светлая полоса, расположенная вертикально. При начальном отклонении первой пружины вверх, а второй — вниз, на экране при их колебании появится светлая горизонтальная полоса. При сдвиге фаз  $\frac{\pi}{2}$  в колебаниях отклоненных пружин светлое пятно опишет на экране круг или эллипс.

Подобная картина сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний будет иметь место лишь при строгом совпадении собственных частот колеблющихся пружин. В случае небольшого различия в собственных частотах пружин, что практически всегда имеет место, проектируемая на экран картина меняется со временем: прямая линия превращается в круг, затем вновь вытягивается в линию и т. д.

Для грубой подгонки собственных частот пружин друг к другу на одной из них укрепляется небольшой передвигаемый груз.

Примерные размеры прибора: длина обеих пружин 180 *м.м.*, ширина 20 *м.м.*, толщина 1—1,5 *м.м.*; диаметр диска 70 *м.м.*

### 43. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний, наблюдаемое с помощью двух электрокамертона

Для демонстрации этого опыта используется установка, описанная в опыте «Сложение на электрокамертонах двух колебаний, направленных по одной прямой», с тем отличием, что ветви второго электрокамертона колеблются в плоскости, перпендикулярной к плоскости колебаний первого камертона. Изменение плоскости колебаний второго камертона производится поворотом его стебля вправо штатива.

Опыт следует начинать со сложения колебаний камертона одной частоты. Сначала демонстрируются на экране колебания первого камертона, например в вертикальном

направлении, далее колебания второго камертона в горизонтальном направлении. Желательно подобрать равное смещение светлого пятна в обоих направлениях. Затем демонстрируются одновременные колебания обоих камертонов. В этом случае светлое пятно на экране начнет описывать эллипс, круг или прямую линию, наклоненную к горизонтальной оси под углом  $45^\circ$ .

При этом способе демонстрирования сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний мы вновь сталкиваемся с нестабильной картиной на экране вследствие несовпадения частот и фаз вибрирующих камертонов. Рекомендуется в процессе демонстрирования этого опыта несколько изменять частоту и фазу колебания одного из камертонов. Плавная регулировка частоты винтом прерывателя электромагнита (см. выше) несколько стабилизирует демонстрируемую на экране картину.

Очевидно, что при постановке этой демонстрации вращающееся зеркало не применяется. Если опыты сложения двух колебаний в одном направлении и в двух взаимно перпендикулярных направлениях демонстрируются на одной лекции (один опыт вслед за другим), то в целях упрощения подготовки демонстраций к лекции вращающееся зеркало не убирается с демонстрационного стола, а одна из его граней используется как плоское зеркало.

Следует заметить, что таким упрощением можно воспользоваться лишь в том случае, если грани вращающегося зеркала достаточно велики. В противном случае вращающееся зеркало убирается и заменяется достаточно большим плоским зеркалом.

Опыт следует повторить на других камертонах с отношениями частот  $1:2$ ,  $2:3$  и т. д.

#### 44. Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний на электронном осциллографе

Для демонстрации этого опыта необходимо собрать схему, изображенную на рис. 52.

Опыт начинаем с того, что добываемся звучания в унисон двух фепродукторов, возбуждаемых двумя от-

дельными звуковыми генераторами (см. демонстрацию «Биение звуковых колебаний»). Затем напряжение от одного из звуковых генераторов подаем на вертикально отклоняющие пластины осциллографа; пользуясь регулятором мощности звукового генератора и регулятором усиления входного вертикального усилителя электронного осциллографа, растягиваем светлое пятно по вертикали примерно на  $\frac{2}{3}$  диаметра флуоресцирующего экрана.

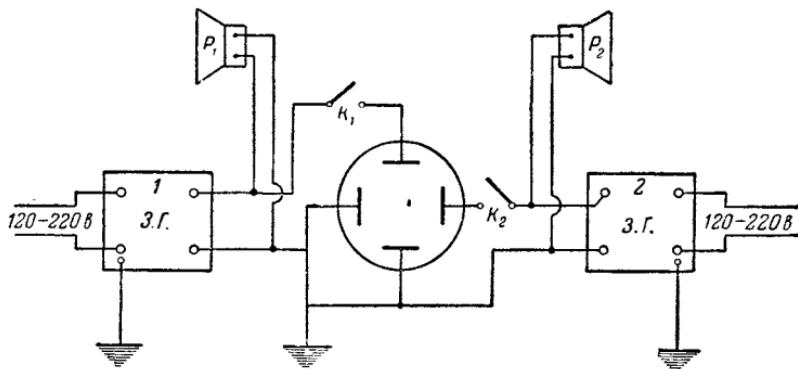


Рис. 52.

Отрегулировав таким образом работу электронного осциллографа, отключаем первый звуковой генератор (ключ  $K_1$  на рис. 52). Далее напряжение от второго генератора подаем на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа и, используя те же технические возможности, получаем по горизонтали светлую полосу той же длины, какая ранее была получена по вертикали.

Следует помнить, что при подаче напряжения от второго генератора на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа необходимо в нем выключить генератор горизонтальной развертки, если опыт ставится на осциллографе ЭО-4 или ЭО-5.

Теперь подаем на отклоняющие пластины осциллографа одновременно напряжения от обоих генераторов. В зависимости от разности фаз между складываемыми напряжениями суммарное смещение светлого пятна по экрану будет представлять собой прямую линию, эллипс или круг.

(рис. 53, *a*). Если разность фаз между этими напряжениями меняется во времени, что почти всегда имеет место в описываемом опыте, то и светящийся рисунок на экране будет все время видоизменяться: прямая линия расши-

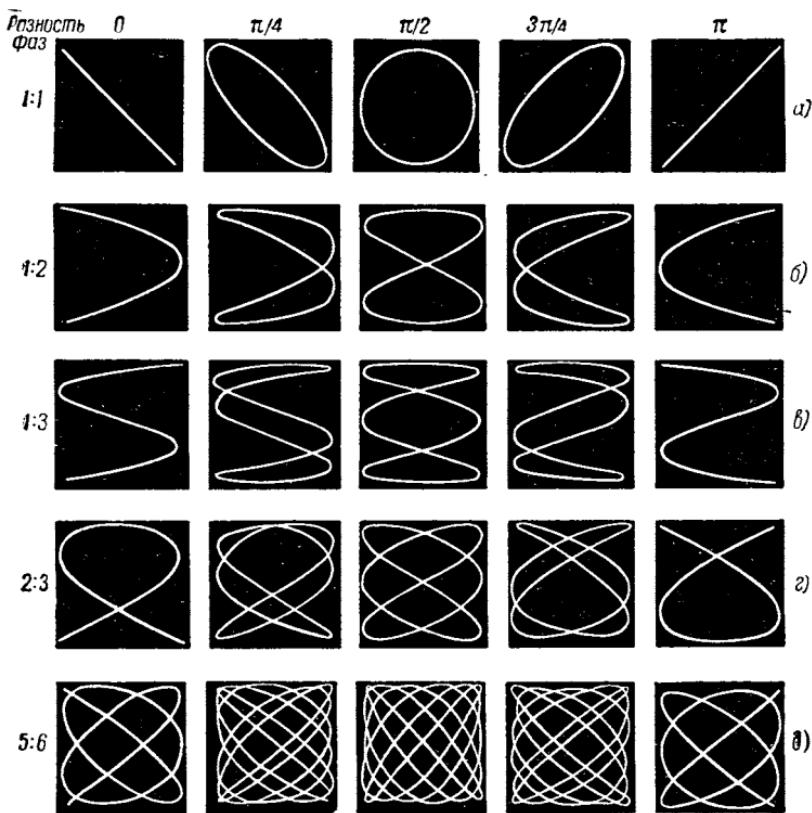


Рис. 53.

ряется в эллипс, эллипс в круг, а затем круг вновь стягивается в прямую линию и т. д.

Следует обратить внимание аудитории на то, что таким образом можно определять частоту переменного тока, сопоставляя неизвестное по частоте напряжение с напряжением эталонного звукового генератора. Появ-

ление на экране эллипса или прямой линии служит признаком равенства частот сравниваемых генераторов.

Начнем медленно изменять частоты одного из звуковых генераторов. В этом случае простая фигура на экране, соответствующая равенству частот (эллипс, прямая, круг), исчезает, а след электронного пучка начинает описывать по экрану осциллографа узор сложных периодически повторяющихся движений.

Следует обратить внимание на то, что площадь, в которую вписываются каждый из этих узоров, всегда равна площади квадрата, описанного вокруг кругового следа, получаемого в первом варианте опыта (равные частоты). По мере дальнейшего изменения соотношения между частотами сравниваемых генераторов светящийся узор линий на экране будет все время изменяться, приобретая самые замысловатые переплетения. Такой сложный рисунок суммарного движения пятна по экрану будет иметь место, пока соотношение частот между складывающимися колебаниями не станет простым. Как только частоты составят простое отношение  $1:2$ ,  $1:3$  или  $2:3$ , то картина на экране внезапно просветлеет и электронный пучок ярко опишет одну из относительно простых фигур, известных в физике под названием фигур Лиссажу. Для упомянутых частот эти фигуры изображены на рис. 53, в строчках *а*, *б*, *в*, *г* и *д*. Если начать изменять частоту второго звукового генератора, то картина этих трансформаций светящегося узора полностью повторится.

Мы уже обращали внимание на то, что вследствие некоторого изменения фазы между сравниваемыми генераторами фигура Лиссажу может несколько меняться даже при постоянном отношении между частотами. Однако эти фазовые изменения картины не столь велики, как изменения, возникающие при варьировании соотношения между частотами генераторов.

Для стабилизации картины сложения двух взаимно перпендикулярных колебаний на экране осциллографа можно рекомендовать такой упрощенный прием. Схема опыта несколько видоизменяется (рис. 54), и демонстрация проводится в такой последовательности. Вновь получают на экране осциллографа вертикальную светлую

линию, затем того же размера горизонтальную. При одновременном наложении на обе пары пластин осциллографа напряжения от одного генератора светлая полоса, соответствующая результирующему движению следа электронного пучка, наклонится к горизонту на угол  $45^\circ$ . Если, пользуясь усилителями электронного осциллографа, получить на экране при демонстрировании неравные вертикальные и горизонтальные светлые линии, то угол, под которым расположится к горизонту результирующая линия

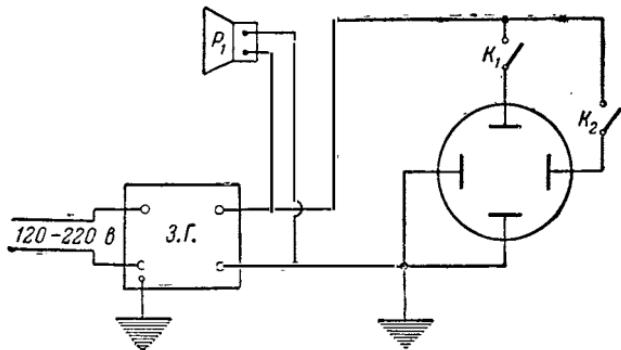


Рис. 54.

колебаний, будет иной. Этот угол, как известно, уменьшается по мере увеличения амплитуды колебания электронного пучка в горизонтальном направлении по сравнению с колебаниями того же пучка по вертикали.

При такой постановке опыта картина на экране совершенно стабильна.

Этот вариант опыта следует повторить на разных частотах (большой и меньшей, чем начальная частота) и обнаружить, что картина суммарного движения следа электронного пучка отнюдь не зависит от частоты складываемых колебаний, а только от соотношения их. Изменения за счет разности фаз сводятся лишь к постепенному переходу фигуры одного ряда в фигуру того же ряда (см. рис. 53). Так, например, при равенстве частот возможно, как мы уже отмечали, изменение прямой линии в эллипс, далее в круг и т. п. (рис. 53, *a*); при соотношении складываемых частот  $1:2$  основная фигура этого

сложения — восьмерка — также несколько видоизменяется во времени (рис. 53, б) и т. д.

Описываемый опыт сложения взаимно перпендикулярных колебаний на электронном осциллографе нагляден в том отношении, что можно непрерывно менять картину результирующего движения электронного пучка по экрану. Эту возможность не дает ни один из вышеразобранных методов демонстрирования сложений взаимно перпендикулярных колебаний.

При постановке этого опыта желательно питать звуковые генераторы стабилизированным напряжением переменного тока и демонстрировать его после того, как прогреются лампы звуковых генераторов и самого осциллографа. Эти меры должны способствовать большей устойчивости картины на экране.

### VIII. КОЛЕБАНИЯ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ

В технике часто встречаются случаи одновременного колебания нескольких тел или систем, связанных тем или иным способом между собой. При колебаниях подобные системы взаимно влияют друг на друга.

Рассмотрим несколько демонстраций, иллюстрирующих эту тему.

#### 45. Колебания двух физических маятников

На прочной металлической раме подвешиваются два физических маятника. Каждый маятник состоит из длинного тонкого металлического стержня, нагруженного в нижней части металлическим шаром (рис. 55). Верхний конец стержня прикреплен к тонкой стальной пластинке, около которой происходят колебания. Между собой маятники соединены тонкой нитью, оттягиваемой небольшим грузом. Такой вид связей обычно называют силовой связью. С помощью таких связанных маятников можно показать ряд опытов.

Отклоним только один из маятников и дадим ему колебаться. Через несколько секунд мы заметим, что второй

маятник постепенно раскачивается при соответствующем уменьшении амплитуды колебания первого. Через несколько секунд первый маятник совсем остановится, в то

время как второй маятник достигнет максимальной амплитуды колебания. Далее колебания второго маятника начнут угасать при постепенном нарастании колебаний первого и т. д. Изменения амплитуды как первого, так и второго маятников при этих колебаниях происходят точно так же, как при биениях, возникающих при сложении двух колебаний. Переход энергии от одного маятника к другому будет происходить до тех пор, пока вся энергия не израсходуется на преодоление трения, сопутствующего всякому движению.

Эта демонстрация дает возможность разобрать ряд вопросов, относящихся к теории колебаний связанных систем. В частности, существенно показать те случаи колебаний связанных систем, при которых каждый маятник совершает только одно гармоническое колебание. Такие колебания могут возникнуть лишь в двух случаях: а) при отклонении обоих маятников на один угол в одну сторону (первое нормальное колебание системы) и б) при отклонении обоих маятников на один и тот же угол в разные стороны (второе нормальное колебание системы).

Частота первого главного колебания будет меньше частоты второго главного колебания системы. Рекомендуется это различие обнаружить на опыте.

Металлические шары можно с помощью небольших муфт *а* с боковыми винтами закреплять на стержнях на

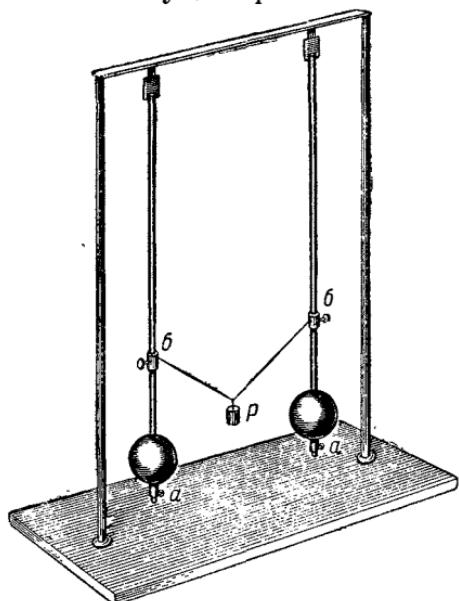


Рис. 55.

любой высоте (рис. 55). Располагая шары на разных высотах, мы создадим связанную систему, отдельные части которой обладают различными собственными частотами. Изменяя величину груза  $P$ , мы можем изменять интенсивность связи между частями системы. В равной степени связь можно изменять, передвигая вверх или вниз по

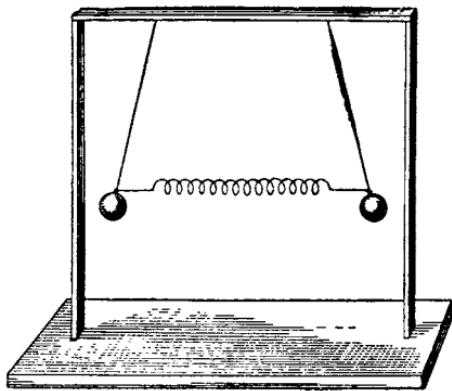


Рис. 56.

стержням муфты  $b$ , к которым крепятся концы соединительной нити, оттягиваемой грузом.

Укажем примерные размеры маятников: диаметр шара 50 *м.м.*; длина стержня 1000 *м.м.*; диаметр стержня 5 *м.м.*.

Колебания связанных маятников можно демонстрировать на более простой установке (рис. 56). К широкой раме длиной 40—50 *см* подвешиваются на двух тонких нитях два свинцовых шарика диаметром 30—35 *м.м.* Шарики подвешиваются на расстоянии 20—30 *см* друг от друга и соединяются между собой «мягкой» спиральной пружиной. С такой установкой можно показать, кроме всех опытов, описанных выше (при отклонении шариков в плоскостях, перпендикулярных к раме), еще опыты, иллюстрирующие колебания шариков в плоскости рамы. Одно из возможных положений шариков при подобных колебаниях изображено на рис. 56. На рассмотрении этой серии опытов мы не останавливаемся.

## 46. Маятник, подвешенный к маятнику (двойной маятник)

На двух равных прочных нитях или на тонких железных проволоках подвешивается тяжелый шар. К шару прикреплены еще две тонкие нити той же длины и на них висит маленький металлический шарик (рис. 57). При самых небольших отклонениях первого шара (амплитуда угловых отклонений  $5^\circ$ ) маленький шарик приходит в интенсивные колебательные движения (амплитуда отклонений его достигает  $60-70^\circ$ ). Однако столь интенсивные колебания маленького шарика не будут постоянны по амплитуде. В этом случае подобно предыдущим разобранным примерам имеет место сложение колебаний связанных систем, что приводит к биениям колебаний. Вследствие значительного различия в массах колеблющихся шаров переход энергии от одного тела к другому мало сказывается на движении большого шара.

*Практические указания.* 1) Большой шар сделан из свинца; диаметр его  $\approx 80$  мм; диаметр маленького шарика  $\approx 10$  мм, длина подвесов  $\approx 800$  мм.

2) К большему шару по линии одного из диаметров привертываются два небольших кольца, к которым крепятся верхняя и нижняя пары подвесов (рис. 57).

3) Можно крепление нитей осуществить иначе. Ниже каждого кольца ввертываются в большой шар дополнительно по одному винту, на которые навертывается вторая нижняя пара нитей. В этом случае удобно изменять длину подвесов маленького шарика.

4) Пользуясь этой установкой, можно показать, что при относительно коротком нижнем подвесе (примерно  $\frac{1}{8}$  от длины верхнего подвеса) явление биений маленького шарика не наблюдается. Маленький шарик полностью повторяет движения большого шара.

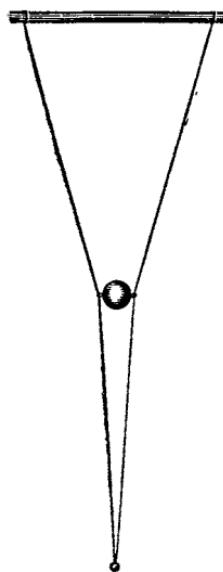


Рис. 57.

## 47. Переход одного вида колебаний в другой

**Переход продольных колебаний в простые и обратно.** На спиральной стальной пружине подвешивается небольшой шар (рис. 58). Если подобрать упругость пружины, ее длину и вес шара такими, чтобы частота простых колебаний \*) маятника была в два раза меньше частоты упругих колебаний вверх — вниз (продольные упругие колебания), то наблюдается интересное явление самоизвольного перехода маятника от одного вида колебаний к другому. Демонстрируем это явление таким образом. Оттянем вниз шар. Он начнет совершать продольные колебания; через несколько секунд он начнет раскачиваться влево и вправо, продолжая совершать продольные колебания вверх и вниз. Затем продольные колебания шара будут постепенно уменьшаться по амплитуде, в то время как простые колебания — нарастать. Далее явление перехода повторится в обратном направлении, т. е. простые колебания будут затухать при нарастании продольных. Такая трансформация энергии будет продолжаться до тех пор, пока весь запас ее не израсходуется на преодоление трения.

**Переход продольных колебаний в кривильные и обратно.** На длинной «мягкой» спиральной пружине подвешивается небольшой груз. Оттянув груз вниз, вызовем тем самым продольные колебания пружины и груза вверх и вниз. Через некоторое время груз начнет совершать

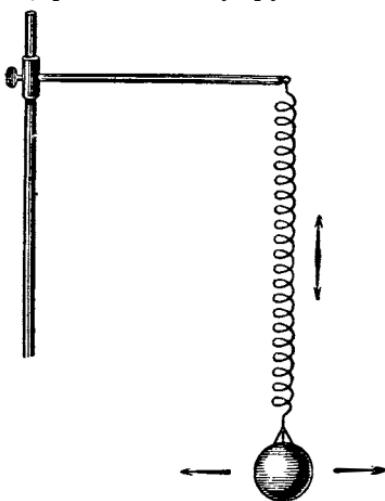


Рис. 58.

\*) Простыми колебаниями мы называем колебания маятника, возникающие под влиянием силы тяжести при отклонении его в сторону на небольшой угол.

помимо продольных еще крутильные колебания, угловая амплитуда которых будет постепенно нарастать, а смещение груза вверх и вниз соответственно уменьшаться. Далее интенсивность крутильных колебаний начнет ослабевать при возрастании интенсивности продольных колебаний и т. д. Следует обратить внимание на те моменты, когда груз совершает только один вид колебаний.

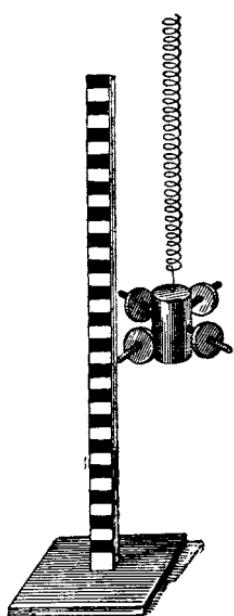


Рис. 59.

*Практические указания.* 1) Приведем размеры спиральной пружины, с которой этот опыт ставился в физическом кабинете МГУ. Спираль намотана стальной проволокой диаметром 1 *мм*, диаметр витка спирали  $\approx 30$  *мм*, число витков  $\approx 130$ , длина ненагруженной спирали 30—35 *см*, длина спирали, нагруженной грузом в 300—350 *Г*, примерно равна 180—200 *см*.

2) Грузу придана форма удлиненного цилиндра. Груз снабжен четырьмя стержнями с резьбой, расположенными симметрично по радиусам цилиндра. Для изменения момента инерции цилиндра на каждый стержень навертываются добавочные шайбы (рис. 59).

3) Важно предусмотреть такое крепление верхнего конца пружины к штативу и нижнего конца пружины к грузу, которое обеспечивало бы центрирование всей системы при колебаниях.

## 48. Вынужденные колебания связанных систем

Вблизи выступающего конца сердечника электромагнита *ЭМ* (рис. 60) укрепляется стальная пластинка *АБ*, нагруженная в верхней части небольшим грузом. Для этого опыта подбирается такая пластинка, чтобы ее собственная частота была несколько больше 100 *гц*. При достаточно большой силе переменного 50-периодного тока, пропускаемого по обмотке электромагнита, пластинка *АБ*

все же приходит в вынужденное колебание с частотой внешней силы \*).

Повторим опыт в ином варианте. Прикрепим к концу пластинки *AB* еще одну пластинку, *BB*, собственная частота колебаний которой точно равна частоте 100  $\text{гц}$ , и вновь возбудим эту сложную колебательную систему электромагнитом, питающимся городским током. В этих условиях пластинка *AB* прекращает свои колебания, а пластинка *BB*, наоборот, начинает сильно вибрать. Такое влияние пластинки *BB* объясняется тем, что она обладает собственной частотой 100  $\text{гц}$  и под действием магнита приходит в более интенсивное движение, чем пластинка *AB*. Так как колебания пластинки *BB* противоположны по фазе колебаниям пластинки *AB*, то колебания последней практически уничтожаются. Опыт приобретает занимательный вид: на совершенно покоящейся пластинке *AB* держится сильно колеблющийся вибратор *BB*. Если же пластинку *BB* задержать, коснувшись ее верхнего конца пальцем (рис. 61), то вся система в целом (оба вибратора) придут, как одна пластинка, в вынужденное колебательное движение с частотой 100  $\text{гц}$ . Опыт предложен проф. С. Э. Хайкиным.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры вибратора *AB*: толщина 1  $\text{мм}$ , ширина 10  $\text{мм}$ , длина 78  $\text{мм}$ ; действующая длина вибратора несколько меньше, так как

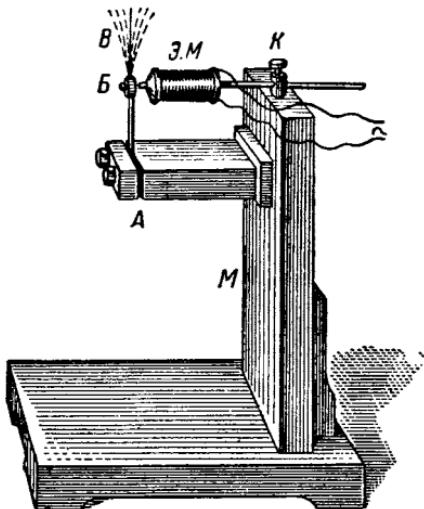


Рис. 60.

\*) Частотой внешней силы в этом опыте является частота перемагничивания сердечника электромагнита, т. е. 100  $\text{гц}$ .

конец его на 1—1,5 см углубляется между крепящими пластинками. Груз, прикрепленный к верхнему концу вибратора, 5—6 г. Второй вибратор, *BB*, так же как и первый, изготовлен из стали. Его размеры: длина  $\approx$  50 мм, ширина  $\approx$  3 мм и толщина  $\approx$  0,4 мм. Второй вибратор крепится к верхнему концу первого небольшим винтом (см. рис. 60).

2) Примерные размеры катушки электромагнита: длина 40 мм, число витков  $\approx$  200, диаметр сердечника  $\approx$  8 мм.

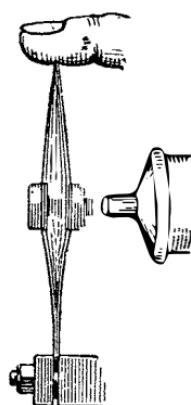


Рис. 61.

Сердечник электромагнита с одной стороны, слева, выступает из катушки на 1—1,5 см, а справа — на 15—20 см и используется в качестве держателя. Крепление сердечника электромагнита к деревянной стойке *M* осуществляется винтом *K* (см. рис. 60). Расстояние между левым концом электромагнита и вибрирующей пластинкой подбирается при налаживании опыта.

3) Сила переменного тока в обмотке электромагнита регулируется реостатом. Можно пользоваться для питания электромагнита понижающим трансформатором.

4) Опыт необходимо проектировать на экран при демонстрации его в большой аудитории. Для этого сначала первый вибратор, а затем оба вибратора сразу проектируются с помощью объектива на экран.

#### 49. Опыт, иллюстрирующий использование вынужденных колебаний для уменьшения качки корабля

При волнении на море качку корабля иногда уменьшают с помощью специальных резервуаров с водой, расположенных в трюме корабля \*). Для демонстрационного рассмотрения этого явления предлагается изготовить следующий прибор.

\*) Впервые водяные резервуары для успокоения судов при качке были введены во флоте в 1884 г. См. В. Л. Поздюнин. Энциклопедия судостроения, изд. Морской транспорт, 1951.

Два стеклянных, довольно емких, цилиндрических сосуда  $A$  и  $A_1$  (рис. 62) соединены между собой изогнутыми трубками. В среднюю часть каждой из таких трубок вделан кран. Сосуды прикрепляются металлическими скобами к деревянному щиту, которому придана форма сечения корабля. Через верхнюю часть щита проходит ось, по отношению к которой весь прибор может свободно качаться. Перед опытом необходимо налить в цилиндры  $A$  и  $A_1$  воды до половины, открыть нижний кран  $K_2$  и закрыть верхний  $K_1$ . После этого можно приступать к самой демонстрации.

Отклоняем щит в сторону на небольшой угол; связанная система (резервуар и вода) приходит в колебательное движение. Однако вследствие того, что левая и правая части резервуара между собой разобщены закрытым краном  $K_1$ , колебания воды внутри резервуара происходить не будут. Прибор с водой будет колебаться как одно тело. После 15—20 затухающих колебаний прибор остановится.

Затем откроем кран  $K_1$  и вновь отклоним щит на тот же угол. Теперь опыт будет протекать иначе. Вследствие того что столб воды в цилиндрах имеет возможность колебаться и его колебания происходят в противоположной фазе с колебаниями щита, весь прибор, сделав только 1—2 колебания, остановится. Если же частоту колебаний столба воды в покоящемся сосуде подобрать в точности равной частоте свободных колебаний всего прибора, то в этом случае система еще сильнее будет заторможена. При отклонении прибора в сторону щит вернется в положение равновесия, не проходя его ни разу в противоположном направлении. В таком виде опыт убедительно демонстрирует явление уменьшения качки корабля

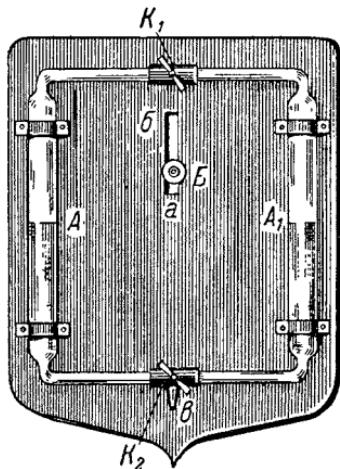


Рис. 62.

при сильных волнениях на море с помощью подобных баков.

Рекомендуется показать такой контрольный опыт. Опускаем на 10—15 см центр тяжести щита относительно точки опоры (см. ниже) и вновь отклоняем на тот же угол прибор. В этом случае частота колебаний всего прибора значительно уменьшается и перестает быть равной частоте колебания столба воды в самом резервуаре. Несмотря на то, что в этом варианте опыта кран  $K_1$  остается открытый

и колебания столба воды в сосуде не затруднены, «успокоение» нашей связанной системы при колебаниях не наблюдается.

*Практические указания.* 1) Для подгонки частоты колебаний всего прибора к собственной частоте столба воды внутри сосуда предусмотрена возможность просто и быстро изменять положение центра тяжести

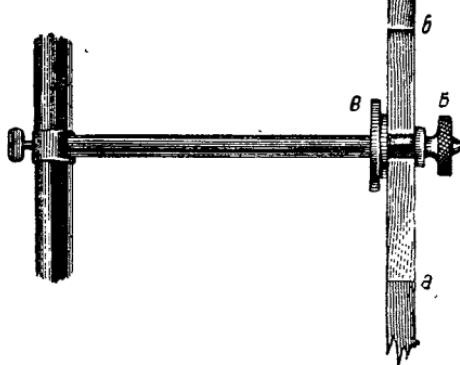


Рис. 63.

типа прибора относительно оси. Это осуществляется следующим образом: на неподвижной оси (рис. 63) свободно вращается металлическая длинная втулка  $B$  с резьбой, нанесенной по внешней поверхности. Щит через щель  $ab$ , прорезанную по оси симметрии прибора, одевается на эту втулку и с передней стороны прочно закрепляется гайкой  $B$ . Меняя точку закрепления щита (в пределах щели  $ab$ ), мы подбираем нужное положение центра тяжести прибора.

Операцию уравнивания частот возможно осуществить также путем изменения количества воды в цилиндрах  $A$  и  $A_1$ . Однако практически это делать менее удобно.

2) Левая и правая части стеклянного резервуара соединены между собой металлическими трубками, закрепленными на стекле хорошим сургучом. Краны  $K_1$  и  $K_2$  вделаны в эти металлические трубки.

3) Кран  $K_2$  выполнен в виде диска. Вращая рукоятку крана  $K_2$ , можно изменять степень затухания столба жидкости при колебаниях. Сила трения, возникающая между движущейся водой и стенками сосуда, определяет величину связи между отдельными частями колеблющейся системы. Положение крана  $K_2$  подбирается при налаживании опыта. Нижнюю соединительную трубку желательно снабдить небольшим отростком  $\epsilon$ , закрываемым пробкой. Через этот отросток сосуды  $A$  и  $A_1$  наполняются водой.

4) Примерные размеры прибора: длина стеклянных цилиндров 500 *м.м.*, их диаметр 40 *м.м.*; общая длина изогнутых трубок 450 *м.м.*, их диаметр 18 *м.м.*; длина соединительных металлических трубок 80—90 *м.м.*.

## IX. ВОЛНЫ

### 50. Механические модели, демонстрирующие возникновение поперечных и продольных волн

Для демонстрации возникновения и распространения поперечных и продольных волн разработано довольно много механических моделей. В настоящем пособии мы лишены возможности рассмотреть все эти приборы. Остановимся лишь на одной модели, которая кажется нам наиболее простой и достаточно наглядной.

На оси  $OO_1$  прочно укреплен ряд равных металлических дисков, расположенных эксцентрично по отношению к оси. Диски сдвинуты друг относительно друга на небольшие углы, так, что все вместе диски образуют как бы одно массивное спиралеобразное тело (рис. 64). На каждый диск опирается металлический стержень, свободно поднимающийся в вертикальном направлении. Если следить за движением одного из стержней (например, за крайним) при вращении ручки прибора, то легко заметить, что конец этого стержня за один оборот диска, на который он опирается, совершил одно колебательное

движение. Второй стержень, соседний с первым, описывает то же самое движение, но только с некоторым сдвигом по

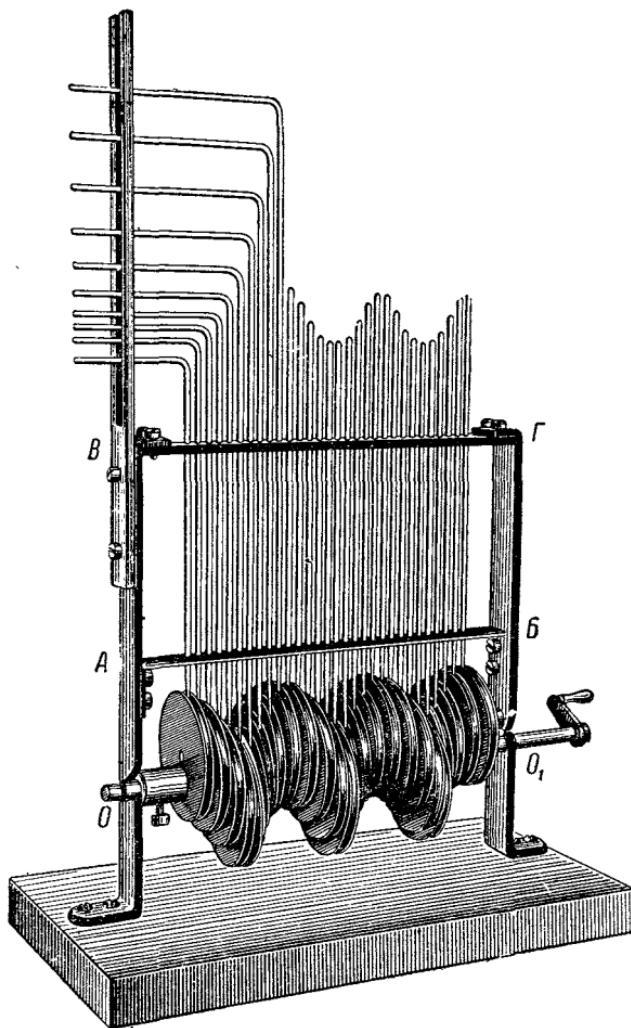


Рис. 64.

фазе, так как диск, на который он опирается, повернут по отношению к первому диску на некоторый угол. Третий стержень описывает тот же путь, но со сдвигом фазы

до отношению ко второму стержню, и т. д. Если взять двадцать таких стержней, что и сделано в правой части рассматриваемого прибора, и столько же дисков, сдвинутых друг относительно друга, то при вращении ручки прибора концы всех стержней в своем движении проиллюстрируют механизм возникновения поперечной волны, распространяющейся в горизонтальном направлении.

Левая часть этого прибора предназначена для демонстрации продольных волн. По своему устройству эта часть прибора напоминает правую часть. Разница заключается лишь в том, что эксцентрично насаженные на ось диски этой части прибора толкают вверх металлические стержни, имеющие форму буквы Г (рис. 64). Расположение дисков и размеры Г-образных стержней подобраны такими, что при равномерном вращении ручки прибора горизонтальные части металлических стержней при своем движении вверх и вниз схематично воспроизводят продольную волну, распространяющуюся в вертикальном направлении.

Прибор демонстрируется в теневой проекции. Рекомендуется сначала проектировать на экран одну часть прибора, затем другую.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры некоторых деталей прибора: диаметр каждого диска 50 м.м., толщина диска 5 м.м., длина всех стержней, воспроизводящих поперечную волну, одинакова и равна 175 м.м., диаметр каждого стержня 3 м.м. Г-образные стержни имеют различную длину. Число всех стержней в приборе — 30.

2) Все стержни у нижнего конца несколько заострены. По боковой поверхности каждого диска нанесен желобок; по этому желобку скользит конец стержня при своем движении.

3) В приборе имеются две направляющие планки *AB* и *VG* с равным числом отверстий; сквозь каждую пару отверстий пропускается опирающийся на диск стержень (рис. 64).

Прибор иногда выполняется в несколько другом варианте. Представим себе набор равных по диаметру

дисков, насаженных эксцентрично на общую ось, но сдвинутых друг относительно друга не по спирали, как это имеет место в предыдущем случае, а по волновой линии (рис. 65); иными словами, центры дисков в этом варианте

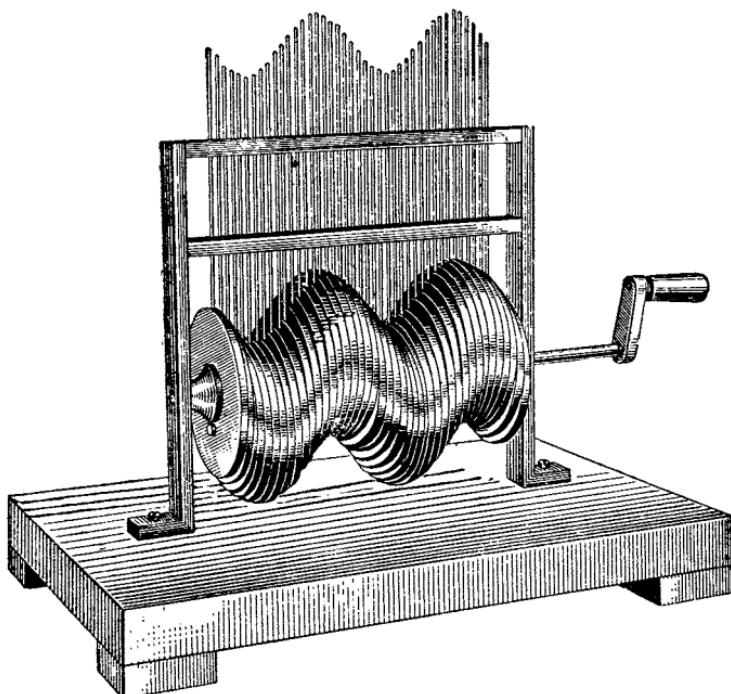


Рис. 65.

прибора располагаются в одной плоскости, образуя синусоиду.

На диски опираются стержни одинаковой длины. В этом случае концы стержней при вращении оси прибора воспроизведут стоячую поперечную волну. При демонстрировании опытов с помощью этого прибора следует обратить внимание аудитории на то, что колебания точек, соответствующих первой полуволне, сдвинуты по фазе на полпериода по отношению к точкам, соответствующим второй полуволне стоячей волны.

## 51. Волны на резиновой трубке

Для демонстрации волн на резиновой трубке следует взять трубку диаметром 10—12 м.и и длиной 7—8 м.

Желательно, чтобы трубка была сплошной (жгут, резиновый шнур). Если же в распоряжении преподавателя нет такой резины, то резиновую трубку можно наполнить водой; для этого ее надевают на кран водопровода и пропускают воду; когда из свободного конца трубки начнет вытекать сильная струя воды, завязывают крепко оба конца. Такое наполнение сделает резиновую трубку более массивной, что является желательным в описываемой демонстрации, хотя крайней необходимости в этом нет.

Затем конец резиновой трубки прикрепляют к стене аудитории (удобно это сделать на высоте 3—4 м), а всю трубку располагают в плоскости, параллельной лекционному столу.

При демонстрации опыта распространения волн на резиновой трубке экспериментатор берет в руку свободный конец трубки и довольно сильно натягивает ее, а второй рукой наносит резкие удары по резине на расстоянии 20—30 см от конца. Удары можно наносить либо просто рукой, либо палкой. Благодаря упругим свойствам резины на трубке возникает волна. Скорость распространения волны будет зависеть от степени натяжения резиновой трубки, а число импульсов — от числа ударов по резине. Демонстрацию можно считать удовлетворительной, если волны получаются достаточно длинные, с большой амплитудой и следуют одна за другой на равном расстоянии.

Сначала лектор фиксирует внимание аудитории лишь на бегущей волне. Когда разобран процесс образования одного волнового импульса или группы импульсов, то следует обратить внимание на получение отраженной волны от закрепленного конца. При достаточном натяжении резиновой трубки отчетливо заметно, как обратная волна, возникшая у закрепленного конца, движется обратно по резине. Сравнивая бегущую волну с отраженной, легко можно заметить, что отраженная волна отстает от

бегущей по фазе на  $180^\circ$ , т. е. теряет при отражении полволны.

Для демонстрации отражения волны от среды с меньшей упругостью, чем та среда, в которой волна распространяется, поступают таким образом. К концу резиновой трубки прикрепляют кусок веревки длиной примерно 0,5—1 м. Конец веревки, точно так же как в предыдущем случае, прикрепляют к стене. Если теперь производить опыт получения отраженных волн, то картина несколько изменится. Отраженная волна, возникшая у закрепленного конца, будет распространяться по резине без потерь полволны.

Оба опыта с отражением волны рекомендуется ставить, ударяя по концу резины один раз, т. е. наблюдая движение лишь одного волнового импульса.

Если демонстратор начнет ритмично колебать свободный конец резины, то на натянутой трубке устанавливаются стоячие волны. Число полуволн, возникших на резине, определяется, как и в предыдущем варианте опыта, степенью натяжения трубы и частотой колебания ее конца.

Все демонстрации с получением волн на резиновой трубке требуют известной тренировки от лекционного ассистента.

## 52. Волны на поверхности воды

Для демонстрации возникновения и распространения волн на поверхности воды применяют плоскую ванну, изготовленную из рамы, в которую вделано толстое прозрачное стекло. Так как ванна при демонстрировании наполняется водой, то необходимо, чтобы она была водонепроницаемой. Опишем один из способов изготовления такой ванны.

Из сухого дерева изготавливается прочно связанная рама, имеющая в сечении вид, изображенный на рис. 66 (косая штриховка). Раму необходимо несколько раз пропитать олифой, а затем жирно прокрасить масляной краской. На нижние выступы  $BC$  и  $C_1B_1$  этой рамы кладется тонкая резиновая полоса (на рисунке резина отмечена черным цветом). На резиновых прокладках располагается

стекло, размеры которого в точности равны расстоянию  $BB_1$ . С каждой стороны сверху стекло прижимается деревянными планками, имеющими в сечении вид треугольника (на рис. 66 планки отмечены двойной штриховкой). Между стеклом и планками также рекомендуется проложить резиновые полосы. Планки прикрепляются к каркасу рамы шурупами. Следует помнить, что при сборке

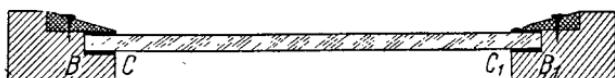


Рис. 66.

ванны необходимо еще раз густо смазать краской соединяемые части.

Ванна, изготовленная по этому способу, при аккуратном с ней обращении (высушивание рамы после демонстрации) будет длительное время совершенно водонепроницаемой.

Глубина ванны 3—4 см. В раме ванны следует сделать отверстие, закрываемое пробкой. Через это отверстие удобно сливать воду.

К описанию ванны следует добавить, что деревянные планки, прижимающие стекло к раме, должны быть срезаны приблизительно под углом в  $30^\circ$ . Назначение подобного канта способствовать затуханию волны. В противном случае возникшая на поверхности воды волна, отразившись от рамы, пойдет в обратном направлении и вызовет искажение волны, идущей в прямом направлении. Можно на срезанную поверхность канта наклеить полосы ворсистой материи, например сукна. В этом случае набегающая на борт рамы волна будет особенно сильно затухать вследствие трения о сукно.

Для проведения демонстрации ванну следует укрепить между столами, на которые она должна лечь только краями своей рамы. Дно ванны не должно ничем затемняться. Ванна располагается горизонтально, иначе слой воды в ней будет не одинаковой толщины и при демонстрации волн возникнут искажения, причина которых будет выяснена ниже. Для горизонтального расположения

ванны пользуются двумя приемами: 1) снабжают ванну уравнительными винтами, укрепленными в углах рамы; 2) по мере надобности приподнимают тот или иной край рамы при помощи острых деревянных клиньев, специально для этой цели изготовленных.

Глубина слоя воды, налитого в ванну, примерно 1 см. Перед демонстрированием рекомендуется провести пальцем по краям рамы с водою, способствуя этим движением смачиванию краев рамы. В противном случае будет наблюдаться искажение проектируемой картины волнами, отраженными от рамы.



Рис. 67.

ченную картину волн можно спроектировать на экран или белую стену. Однако такая проекция волн будет несколько искаженной.

Для демонстрации круговой волны экспериментатор быстро и равномерно опускает в воду палец или стеклянную палочку. На потолке зрители увидят ряд волн, которые расходятся в виде концентрических кругов от места погружения в воду пальца или палочки. Необходимо убедить зрителя в том, что наблюдаемая им волна

Весь слой воды проектируется на потолок аудитории при помощи дуги Петрова или точечной электрической лампы, расположенной под ванной (рис. 67). В качестве точечной лампы можно взять лампу для кинопроекции: 12 в, 50 вт. Если сдвинуть источник света, то полу-

поперечная и частицы воды колеблются в направлении, перпендикулярном к распространению волны. Для этого можно на поверхность воды набросать несколько кусочков бумаги или деревянных палочек, которые при освещении ванны дугой Петрова проектируются на потолок в виде темных пятен. Затем следует вновь вызвать ряд круговых волн, которые, расходясь к краям ванны, не будут увлекать с собой плавающие на поверхности воды предметы. Кусочки бумаги будут испытывать колебания лишь в направлении, перпендикулярном к плоскости ванны; в проектируемой на потолке картине тени от бумажек будут неподвижны.

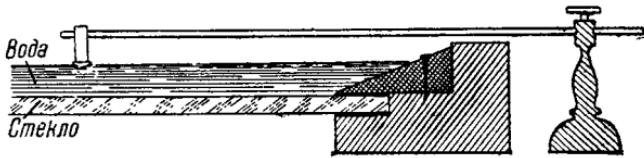


Рис. 68.

Пальцем или стеклянной палочкой неудобно вызывать круговые волны, так как при этом довольно трудно добиться одинакового расстояния между отдельными расходящимися волнами. Поэтому существует много приемов погружения стержня в воду. Опишем несколько наиболее простых.

Стальная пружина размером  $30\text{ см} \times 2,5\text{ см}$  (полотно ножовки) закрепляется одним своим концом в массивной подставке, придвигаемой к краю ванны (рис. 68). Ко второму концу пружины припаивается небольшой стерженек. Период колебания такой пружины подбирается примерно равным  $\frac{1}{4}—\frac{1}{2}$  сек. Отводя вверх эту упругую пружину, мы вызываем периодические погружения стержня в воду. Картина на экране получается более четкой, чем при погружении пальца. Зажимая пружину в различных местах, возможно подобрать наилучшие условия для данного опыта.

Назовем некоторые другие приемы получения круговых волн: 1) на поверхность воды из емкой капельницы равномерно вытекают капли; 2) стержень, опускающийся

в воду, приводится в движение при помощи электромагнита с прерывателем; 3) стержень, опускающийся в воду, приводится в колебательное движение с помощью небольшого моторчика, связанного с эксцентриком.

Не останавливаясь на всех возможных приемах получения круговых волн, мы обращаем внимание лишь на одну сторону, общую для всех приемов: пружину со

стержнем следует закреплять в какой-либо опоре, не связанной с рамой. Если пружина прикреплена к самой раме, то механические сотрясения рамы и добавочные волны в воде, возникающие при этом, сделают картину волн на поверхности воды менее отчетливой.

Поставим на пути круговой волны металлический щит размерами  $20\text{ см} \times 4\text{ см}$  (рис. 69, а). В этом случае мы получим на экране изображение отраженной волны, которая подобно проходящей, будет круговой. Для устранения вибрации щита, которая может повлечь за собой

образование дополнительных волн около самого щита и тем самым искажение картины отражения, мы рекомендуем щиты изготавливать не из жести, как это довольно распространено в практике физических кабинетов, а отливать из свинца. Щиту следует придать вид призмы с крутыми краями (рис. 69, б). Отливать подобные призмы можно в форме из углового железа.

Для демонстрации плоской волны экспериментатор должен периодически опускать в воду деревянный стержень (линейку). При этих манипуляциях рекомендуем держать линейку двумя руками, чтобы вызвать одновременное погружение всего края линейки в воду. Для получения более четкой картины плоских волн можно употребить прием, изображенный на рис. 68, укрепив на пружине уже не стерженек, а плоскую пластинку. Если на

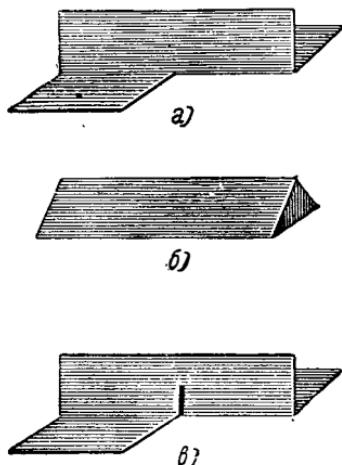


Рис. 69.

пути распространения плоской волны поставить под углом щит, то зритель на экране увидит отраженную волну. При четкой проекции возможно указать углы падения и отражения волны и отметить равенство этих углов.

Опыты с отражением волны можно повторить с вогнутым щитом (вогнутый щит не изображен на рис. 69).

Если на пути распространения плоской волны поставить щит, у которого сделана в середине щель (см. рис. 69, *в*), то волна отразится от всех точек щита, за исключением точек отверстия. У отверстия возникнет новая круговая волна, которая будет далее распространяться за щитом. Удобнее описанный вариант опыта ставить не со щитом, изготовленным из жести, а с двумя свинцовыми щитами (рис. 69, *б*), располагаемыми по одной прямой на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга. В этом случае щелью будет являться зазор между щитами, размеры которого можно подобрать в зависимости от требований эксперимента.

В условиях нашего опыта скорость распространения волны зависит от глубины налитого в ванну слоя воды. В случае небольшой глубины слоя скорость распространения волны вследствие большого сопротивления дна будет меньше, чем в случае большей глубины слоя. Это обстоятельство дает возможность продемонстрировать явление преломления волны.

В ванну погружают стеклянную прямоугольную пластинку, толщина которой примерно равна половине глубины слоя воды. К пластинке можно приклеить пробковые ножки. Вода тонким слоем покрывает стеклянную пластинку. Очевидно, что волна над пластинкой будет распространяться с меньшей скоростью, чем в других местах ванны. Различие в скоростях распространения в разных местах вызовет изменение направления движения волны. Если пластинка имеет форму двояковогнутой линзы, то плоская волна при прохождении над такой «мелью» изменит форму фронта и из плоской волны превратится в сферическую. Следует иметь в запасе несколько стеклянных пластин различной толщины: прямоугольные, в виде линз с различными радиусами кривизны и т. д. Данный опыт лишь тогда четко получается, когда удачно

подобраны глубина слоя воды, толщина стеклянной пластины, частота и амплитуда колебаний вибратора.

Для демонстрации интерференции волн на поверхности воды необходимо создать два одинаковых источника волн, расположенных друг от друга на некотором расстоянии (7—8 см). Один из приемов получения интерферирующих колебаний заключается в следующем (рис. 70): к вибра-

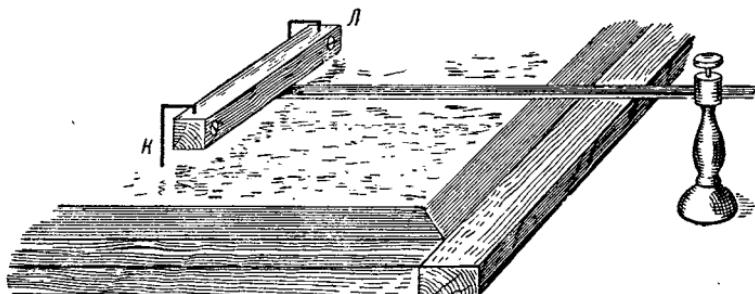


Рис. 70.

тору прикрепляют пластины, на концах которой находятся стерженьки (*К* и *Л* на рис. 70). Стерженьки укрепляются в пластине боковыми винтами; поворачивая стерженьки в отверстиях пластины, можно несколько изменять расстояние между ними. Если теперь привести в колебательное движение вибратор, то одновременно опускающиеся в воду стерженьки создадут два ряда круговых волн, которые будут между собой интерферировать.

На экране можно указать полосы усиления и ослабления колебаний, которые расположатся по ветвям гипербол. Фокусами этих гипербол являются вибраторы.

### 53. Прибор Богословского для демонстрации капиллярных волн на поверхности жидкости

Волны, возникающие в тонком поверхностном слое жидкости, называются капиллярными. Скорости распространения и длины капиллярных волн определяются не только силой тяжести, но и силами поверхностного натяжения жидкости. Длина капиллярных волн весьма небольшая.

Для демонстрирования получения и распространения на поверхности жидкости столь коротких волн, какими являются капиллярные, Е. В. Богословский разработал остроумную методику и сконструировал оригинальный прибор \*). Методика Богословского оказалась настолько удобной, что до сих пор в Московском университете ею пользуются для демонстрации на лекциях основных явлений, характеризующих распространение любых волн.

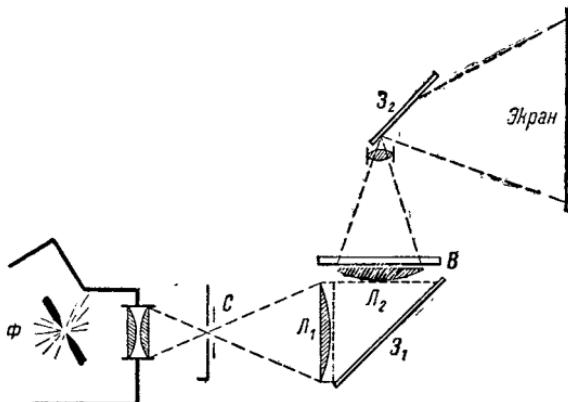


Рис. 71.

Опыты на установке Богословского демонстрируются не только на лекциях по механике, но и на вводных лекциях по курсу экспериментальной оптики.

Рассмотрим устройство прибора Богословского. На рис. 71 представлена упрощенная схема этого прибора, а на рис. 72 — его общий вид.

Пучок света от дугового фонаря  $\Phi$  сходится у отверстия диска стробоскопа  $C$ , приводимого в равномерное движение мотором постоянного тока. Расходящийся от этого

\*) Е. В. Богословский разработал описываемый прибор в лаборатории своего учителя П. Н. Лебедева при участии И. Ф. Усагина и впервые продемонстрировал его на XII съезде русских естествоиспытателей и врачей в 1910 г. (см. статью В. К. Аркадьевича «Памятники Е. В. Богословского», Успехи физических наук, 1939, т. XXI, вып. 3, а также статью «Опыты Е. В. Богословского» в журнале «Физическое обозрение», т. 11, 1910, Киев; статья подписана инициалами А. И.).

места пучок света, несколько собранный линзой  $L_1$ , падает на большое плоское зеркало  $Z_1$ , расположенное под углом  $45^\circ$  к горизонту. Отраженные от этого зеркала лучи света еще сильнее собираются плосковыпуклой линзой  $L_2$  и далее сходящимся пучком освещают небольшую

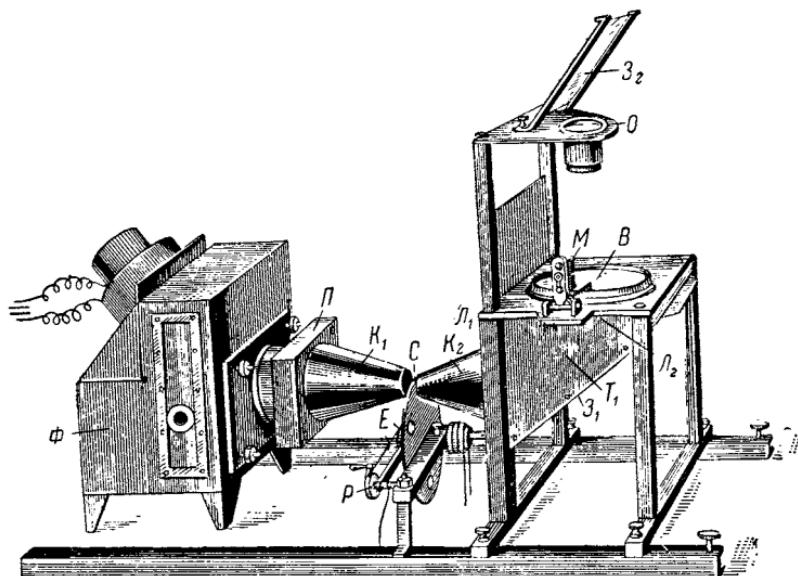


Рис. 72.

плоскую ванну  $B$ , заполненную жидкостью с малой вязкостью, например ацетоном \*). Волны, возникающие на поверхности ацетона под действием вибрирующего стерженька (см. ниже), проектируются с помощью объектива  $O$  и второго плоского зеркала  $Z_2$  на вертикальный экран.

В целях ограждения аудитории от рассеянного света в установке предусмотрены два конуса  $K_1$  и  $K_2$ , внутри

\*) Линза  $L_2$  расположена под ванной  $B$ . Ее диаметр почти равен диаметру ванны, т. е. примерно 350 м.м.

После конденсора располагается плоскопараллельный стеклянный сосуд  $\Pi$ , заполняемый водой. Этим сосудом следует пользоваться при длительной демонстрации капиллярных волн. В противном случае ацетон будет прогреваться и картина капиллярных волн на экране будет пеустойчивой (см. рис. 72).

которых распространяется пучок света, и два боковых щита (на рис. 72 изображен лишь один боковой щит  $T_1$ ).

К металлической стойке вблизи стеклянной ванны  $B$  прикрепляется электромагнитный вибратор  $M$ , стержень которого может колебаться с относительно большой частотой (1000—2000 колебаний в минуту). При каждом погружении конца вибратора в жидкость на поверхности ацетона появляется новая капиллярная волна. Для получения разных волн (круговых, плоских) на конце вибратора укрепляют различные насадки (см. предыдущую демонстрацию).

Для обнаружения столь коротких волн, какими являются капиллярные, необходимо применение стробоскопического освещения. В установке Богословского включение и выключение тока в электромагнитном вибраторе синхронизированы с вращением диска, который периодически закрывает свет от фонаря. При этих условиях картина распространения капиллярных волн на поверхности жидкости всегда проектируется на экран только в одной фазе. Зритель видит на экране волны не в их движении, а в неподвижном состоянии (как бы их моментальный фотоснимок). Если нарушить синхронизацию между вращением диска и колебаниями вибратора, то проектируемые на экран волны на поверхности ацетона начнут передвигаться в ту или иную сторону. В остальной демонстрации опытов на приборе Богословского сводится к тем же приемам, какими обычно пользуются при воспроизведении волновых процессов на поверхности воды (см. предыдущую демонстрацию).

На рис. 73 показано распространение волн от вибрирующего стерженька при равномерном погружении его в ацетон.

На рис. 74 показана интерференция волн, исходящих от двух вибрирующих стерженьков при одновременном погружении их в ацетон.

На рис. 75 изображена система плоских волн, полученных при вибрации стержня, на конце которого закреплена продолговатая пластинка. На пути распространения плоских волн поставлено препятствие, вследствие чего возникла дифракция волн.

Рис. 76 изображает явление преломления плоских волн. Для этого на дно ванны с ацетоном погружается плоскопараллельная стеклянная пластина. При прохож-

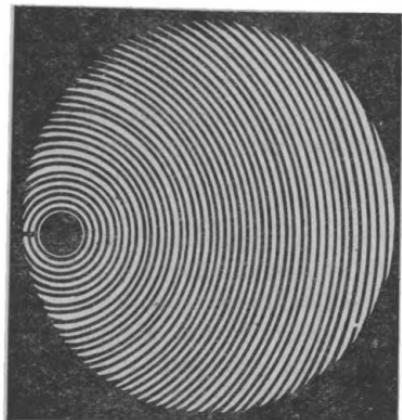


Рис. 73.

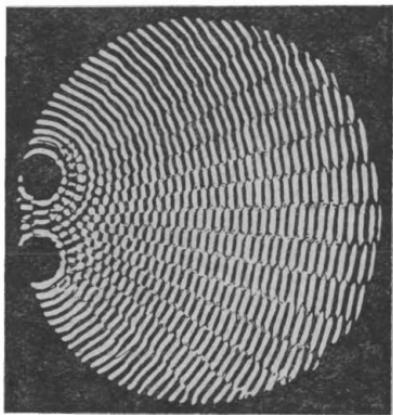


Рис. 74.

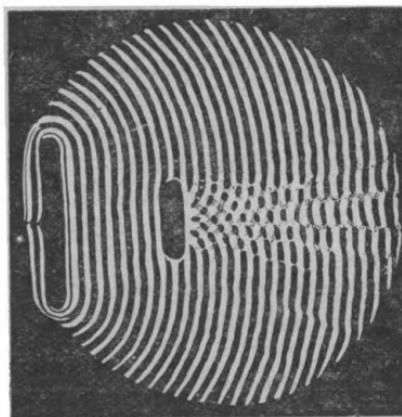


Рис. 75.

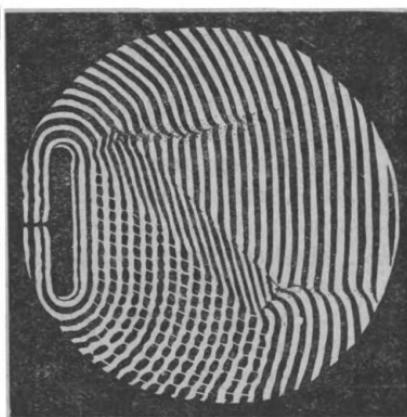


Рис. 76.

дении волн над такой «мелью» скорость их уменьшается. Все четыре фотоснимка были выполнены в свое время Е. В. Богословским и помещены в журнале «Физическое обозрение» (см. сноску на стр. 123).

Перейдем к более подробному рассмотрению основных деталей установки — к технике синхронизации вращения стробоскопа и колебаний вибратора.

Электромагнитный вибратор (рис. 77) состоит из двух небольших цилиндрических катушек 1 и 2, скрепленных между собой своими основаниями; витки в этих катушках нанесены в противоположных направлениях и соединены между собой последовательно. В общем канале катушек располагается железный стерженек, удерживаемый с концов пружинами. Конец стержня, выходящий из нижнего отверстия, несколько длиннее. К этому концу прикрепляются различные насадки, которые при вибрации стержня погружаются в ацетон. Стержень электромагнитного вибратора приходит в колебательное движение вследствие того, что постоянный ток, питающий обмотки прерывателя, попеременно поступает с помощью коммутатора  $E$  то в верхнюю, то в нижнюю обмотку катушек прерывателя. Синхронизация переключения тока в обмотках и вращения стробоскопа достигается тем, что диск стробоскопа укреплен на одной оси с коммутатором. При этих условиях синхронизация наступает при любой скорости вращения мотора.

Рассмотрим теперь вкратце устройство коммутатора, примененного в приборе Богословского (рис. 78).

Коммутатор  $E$  состоит из двух медных равных по размерам зубчаток, вложенных одна в другую. Зубцы одной зубчатки расположились между зубцами другой. В результате такого соединения получилось цилиндрическое тело. В местах соприкосновения зубцов нанесен слой изоляционного лака, вследствие чего одна часть коммутатора электрически изолирована от другой. Поверхности такого коммутатора касаются три одинаковые щетки

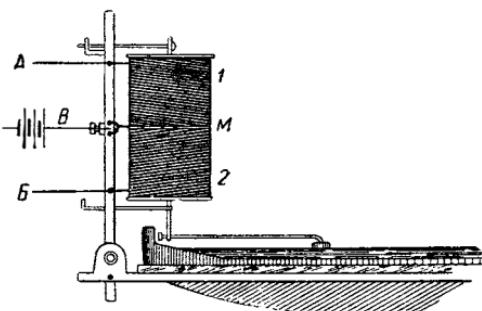


Рис. 77.

(*A*, *B* и *B*), которые соединены через кольца *A*<sub>1</sub> *B*<sub>1</sub> *B*<sub>1</sub> соответственно с концами катушек прерывателя и с одним из полюсов батареи, питающей прерыватель. В одном положении коммутатора ток попадает в первую катушку вибратора и не попадает во вторую. При повороте переключателя на угол 60° щетка *B* коснется правой половины переключателя, по которой скользит щетка *B*. Теперь

ток будет поступать во вторую катушку вибратора. Следовательно, при вращении коммутатора *E* и диска стробоскопа электрический ток попеременно будет поступать то в одну, то в другую обмотку вибратора, причем эти перемены будут совпадать с моментом прохождения и задержек светового потока, освещавшего ванну с ацетоном.

Коммутатор *E* имеет шесть пластин, диск стробоскопа — три отверстия.

Если желательно нарушить синхронизацию между вращением диска и колебаниями вибратора, то необходимо изменить положение щеток *A*, *B* и *B* относительно пластин коммутатора *E*. Для этого в приборе Богословского предусмотрена возможность медленно вращать от руки весь щеткодержатель *D*, на котором укрепляются щетки *A*, *B* и *B* \*). (Рукоятка *P* на рис. 72 и 78.)

Щеткодержатель *D* представляет собой диск из изоляционного материала, сидящий на оси. Ось, несущая на себе щеткодержатель *D*, расположена по одному направлению с осью стробоскопа, но механически и элек-

\*) Из конструктивных соображений удобнее было щетки *A*, *B* и *B* расположить не параллельно между собой, а по окружности щеткодержателя.

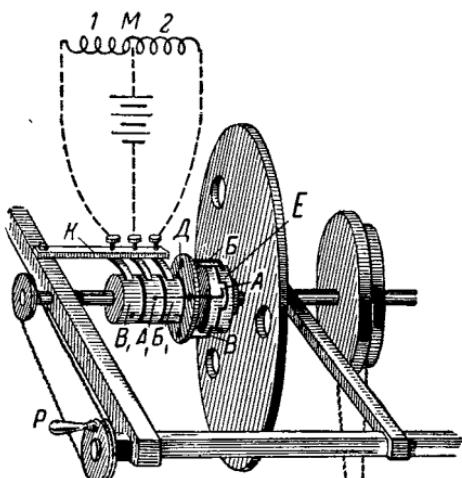


Рис. 78.

трически с последней не связана. При медленном вращении щеткодержателя  $D$  с помощью ручного привода  $P$  картина волн на экране начнет двигаться в ту или иную сторону в соответствии с направлением и величиной скорости вращения щеткодержателя. Поскольку щеткодержатель  $D$  может вращаться, соединение концов обмоток вибратора  $M$  и одного полюса аккумулятора со щетками  $A$ ,  $B$  и  $V$  не может быть постоянным.

В установке Богословского предусмотрена подача тока к щеткам  $A$ ,  $B$  и  $V$  через три медных кольца  $A_1$ ,  $B_1$  и  $V_1$ , с которыми скользящими контактами соединены концы обмоток вибратора и один полюс аккумулятора. Эти кольца насажены на одну ось с щеткодержателем  $D$  и при вращении последнего, когда необходимо нарушить синхронизацию, также вращаются. Контакты, скользящие по кольцам  $A_1$ ,  $B_1$  и  $V_1$ , прикреплены к пластинке  $K$  из изоляционного материала (рис. 78). Все скользящие контакты изготовлены из мягкой латуни и допускают вращение коммутатора в обоих направлениях.

Вся установка Богословского смонтирована на крышке довольно массивного стола, где расположены все необходимые части установки: дуговой фонарь, мотор, объектив, реостаты для регулировки скорости вращения мотора и для регулировки силы тока в обмотках вибратора и т. д.

Ножки стола опираются на ролики, так что передвижение стола в аудиторию из помещения, где хранятся физические приборы, несмотря на тяжесть всей установки, не представляет большой трудности для обслуживающего персонала.

#### 54. Прибор для демонстрации продольных волн

Прибор представляет собой длинную спиральную пружину, горизонтально подвешенную на нитях (рис. 79). На такой пружине можно показать ряд опытов, иллюстрирующих процесс возникновения и распространения продольных волн.

Если с одного конца спирали нанести рукояткой резкий толчок по направлению оси спирали, то зона уплотнения витков спирали, возникающая у конца, начнет быстро

передвигаться вдоль длины спирали. При хорошем освещении пружины (см. ниже) легко заметить даже в большой аудитории, что продольная волна (зоны сгущений и разрежений витков спирали) дойдет до противоположного конца спирали и, отразившись от него, будет распространяться в обратном направлении. Отраженная волна дойдет до конца, где был произведен начальный толчок, и волновой импульс повторит свое движение сначала. Правда, каждое новое отражение волны будет вызывать

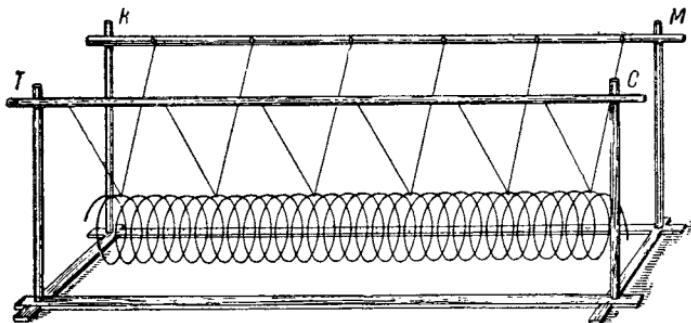


Рис. 79.

раскачивание всей пружины в целом, и картина распространения упругой волны будет в дальнейшем терять свою выразительность.

Начальный толчок можно произвести иначе: экспериментатор захватывает последний виток пружины большим и указательным пальцами, быстро оттягивает его к себе (по направлению оси спирали) на расстояние 2—4 см и затем виток отпускает. В этом случае также возникает волна, распространяющаяся вдоль пружины.

Опыт следует повторить, закрепляя конец пружины, где происходит первое отражение волны, в лапах массивного штатива.

На спиральной пружине можно показать образование стоячих продольных волн как при свободных, так и при закрепленных концах пружины. Операция получения стоячих волн сводится к следующему: экспериментатор располагает руки (ладонями друг к другу) между витками

(на расстоянии 5—6 витков от середины спирали) и периодическими легкими движениями рук к середине спирали и к ее концам возбуждает пружину, затем принимает руки. В этом случае возникает стоячая волна, узел которой расположится на середине пружины, а пучности — на концах. Возбуждение стоячей волны можно произвести несколько иначе: экспериментатор легко подхватывает руками снизу пружину и качающими движениями рук возбуждает пружину. Если руками захватить другие части спирали, то узлы и пучности можно получить в других ее частях.

*Практические указания.* 1) Для этого опыта следует брать не очень упругую, но достаточно густую пружину. Размеры пружины: диаметр витка  $\approx 15$  см, длина пружины  $\approx 1800$  мм, число всех витков  $\approx 90$ . Наматывать пружину следует из латунной проволоки диаметром 2—2,5 мм. Упругость пружины должна быть одинаковой по всей длине.

2) Каждый пятый-шестой виток спирали подвешивается на двух тонких нитях длиной  $\approx 60$  см, прикрепленных к двум параллельным брусьям *КМ* и *ТС* (см. рис. 79). При подвешивании на нитях столь длинной спирали последняя может искривиться так, что ее ось перестанет представлять прямую линию. В этом случае необходимо выровнять в целом спираль. Это можно сделать таким образом: изменить длину нитей подвеса пружины вращением колоков, ввернутых в деревянные планки *ТС* и *МК*.

3) При демонстрировании опытов распространения волн на пружине желательно пружину освещать. Для этого посыпают параллельный пучок света от дугового фонаря под небольшим углом к оси пружины так, чтобы равномерно осветить все витки спирали.

4) Можно пружину проектировать на экран в теневой проекции. Желательно это сделать так, чтобы сама пружина не мешала аудитории рассматривать ее проекцию на экране. Для этого рекомендуется дуговой фонарь расположить перпендикулярно к длине спирали, причем несколько ниже плоскости, в которой лежит ось пружины.

## Х. ИСТОЧНИКИ ЗВУКА

### 55. Звучание зажатой пластины

В разделе «Элементарные опыты по колебаниям» мы разбирали опыт колебания зажатой в тиски пружины. При изложении отдела «Звук» рекомендуется вернуться к этому опыту и воспроизвести колебания пружины, зажимая ее в разных местах. Опыт следует начать с пружины такой длины, при которой не возникает в воздухе слышимых звуков. Затем пружину следует укоротить настолько, что при ее колебаниях появятся низкие звуки, воспринимаемые человеческим ухом. Это укорочение свободного конца пружины следует производить и далее, получая все более и более высокие тона. При очень коротком конце пружины (2—3 *мм*) колебания воздуха столь часты, что человеческое ухо вновь перестает их воспринимать.

Возбуждение конца пружины производится пальцем или палочкой: демонстратор отводит свободный конец в сторону и затем отпускает его. Звуки, получаемые с помощью зажатой пружины, весьма «нечистые», в них присутствует много обертона, придающих звукам дребезжащую окраску. Все же при последовательном укорочении пружины уловить повышение тона звука всегда можно.

Укажем ориентировочные размеры стальной пружины для этого опыта: длина  $\approx 30$  *см*, ширина  $\approx 12$  *мм*, толщина  $\approx 0,5$  *мм*.

### 56. Камертон

Камертон — физический прибор, издающий звук строго определенной частоты. В колебаниях ветвей камертона, изготовленного из хорошей стали, весьма мало обертонов. Иногда камертоны используются в качестве стабилизатора звуковой частоты в ламповых генераторах. На камертоне следует показать ряд опытов.

**Наблюдения за колебаниями ветвей камертона.** К ветви звучащего камертона приближают небольшой костяной шарик диаметром 5—6 *мм*, подвешенный к штативу на

тонкой нити (рис. 80). При соприкосновении камертони с шариком последний отскакивает. Толчки, получаемые шариком, весьма неравномерны. Эта неравномерность определяется сдвигом фазы в колебаниях камертони и маятника. Несмотря на беспорядочность движений шарика, этот демонстрационный прием все же является наиболее наглядным. В известном опыте резонанса двух камертонов и в других опытах (см. ниже) он также находит себе применение.

Полезно прикоснуться подвешенным шариком к разным местам звучащего камертони и таким образом уловить, какие части камертони возбуждаются с наибольшей амплитудой. Можно коснуться шариком колеблющихся ветвей камертони с внутренней стороны. В этом случае шарик подвергается толчкам со стороны двух ветвей камертони.

Наблюдение за колебаниями звучащего камертони можно осуществить при стробоскопическом освещении ветвей камертони (см. описание опыта «Струя в стробоскопическом освещении» в «Лекционных демонстрациях по физике», выпуск 2). При частоте мерцающего света, близкой к частоте колебаний камертони, на экране будут спроектированы движения ветвей камертони с частотой, равной разности между частотами (0,5—1 колебание в секунду). При столь медленных колебаниях нетрудно уловить, что ветви камертони совершают колебательные движения в противоположных друг к другу фазах. Если достигнута полная синхронизация между колебаниями камертони и вспышками света, освещающего камертони, то проектируемая картина остановится: на экране будет виден теневой рисунок камертони, «застывшего» в определенной фазе колебания. Особо выразительна картина, когда ветви камертони разошлись друг от друга на

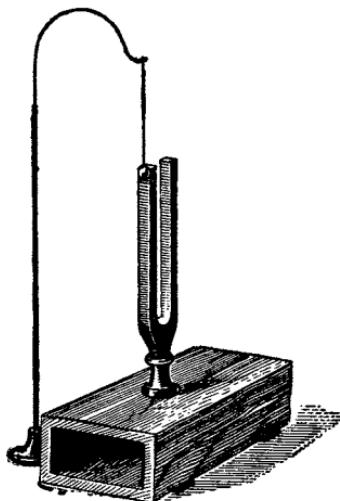


Рис. 80.

наибольшее расстояние или, наоборот, максимально сблизились. Определяя в этот момент частоту мотора, вращающего диск стробоскопа, и число отверстий в диске, можно определить частоту колебаний камертонов.

Вследствие того что обычный камертон относительно быстро затухает, опыт наблюдения колебаний ветвей камертонов в стробоскопическом освещении лучше производить с электрокамертоном (см. выше демонстрацию «Вынужденные колебания струны»). Собственная частота электрокамертонов не должна быть большой (75 гц). Для этого опыта желательно взять камертон с возможно более длинными ветвями, тогда размахи ветвей камертонов на экране будут более заметными.

**Роль резонаторного ящика.** Камертон снимается с резонаторного ящика и ударом резинового молоточка по ветви вызывается его звучание. Предлагается аудитории прислушаться к этому звуку. Затем стебель звучащего камертонов ставится на резонаторный ящик. Звук, издаваемый камертоном, в этом случае резко усиливается.

Желательно оценить силу звука камертонов в обоих случаях (без резонаторного ящика и с ним) одним из объективных методов. Для этого необходимо вызвать звучание камертонов перед микрофоном, который связан через ламповый усилитель с демонстрационным вольтметром или с электронным осциллографом (см. демонстрацию «Измерение силы звука»).

Существенно в этом опыте показать, что продолжительность звучания камертонов без резонаторного ящика больше, чем при наличии его. При демонстрации этого сравнительного опыта необходимо возбудить камертон в обоих случаях одинаково интенсивно.

**Резонирование воздушного столба на колебания камертонов.** Для выяснения роли столба звука в резонаторном ящике камертонов следует показать такой простой опыт.

Высокая мензурка наполняется почти до краев водой. Стеклянная цилиндрическая трубка *A*, несколько меньшего диаметра, чем внутренний диаметр мензурки, опускается в воду и удерживается там навесу так, чтобы часть ее выходила наружу (рис. 81). Затем к открытому концу трубки подносят звучащий камертон. Если высота воз-

душного столба в стеклянной трубке *A* будет равна четверти длины звуковой волны, излучаемой камертоном, то вследствие резонирования воздуха на эти колебания звук резко усилятся.

При изменении длины воздушного столба явление резонанса исчезает. Этот опыт демонстрируется следующим образом: экспериментатор медленно передвигает вверх звучащий камертон и трубку *A*, следя за тем, чтобы расстояние между камертоном и открытым концом трубы *A* оставалось все время постоянным. Теперь объем воздуха над уровнем воды в трубке *A* возрастает, и звучание его слабеет. Когда длина воздушного столба достигает  $\frac{3}{4}$  длины звуковой волны, излучаемой камертоном, то звучание вновь усилятся. Правда, в этом случае усиление звука будет менее резким, чем в условиях первого максимума.

Полезно сопоставить при резонансе длину воздушного столба с длиной резонаторного ящика камертона.

Удобно взять для постановки рассматриваемого опыта трубку с делениями. В этом случае длина звуковой волны получается непосредственно из опыта. Воду в мензурке можно чем-либо подкрасить.

Демонстрацию следует повторить на камертонах другой частоты.

Явление резонирования столба воздуха на звуковые колебания можно показать еще другими приемами. На рассмотрении их мы не останавливаемся \*).

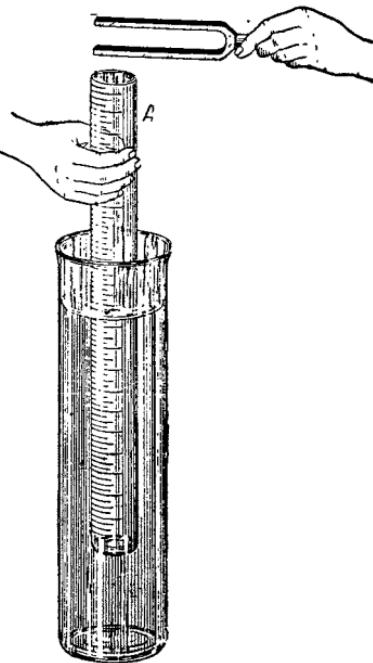


Рис. 81.

\*) См. Галанин Д. Д., Горячкин Е. И. и др., Физический эксперимент в школе, т. VI.

**Интерференция звуковых волн, излучаемых камертоном.** Известно, что звуковые волны, вызываемые вибрирующими ветвями камертона, находятся в противофазе. Вследствие этого волны частично уничтожают друг друга, особенно в определенных направлениях.

Для наблюдения явления интерференции звуковых волн поступают следующим образом: снятый с резонаторного ящика и возбужденный ударом молоточка камертон приближается к отверстию ящика примерно на расстояние 6—9 см (рис. 82).

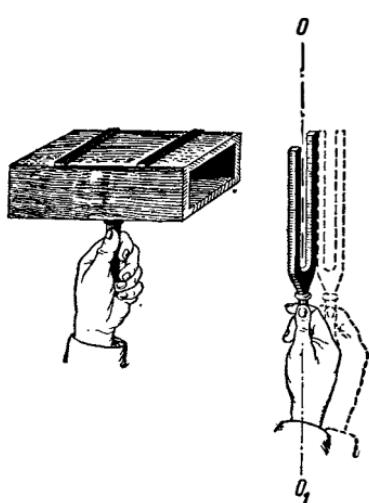


Рис. 82.

Если звучащий камертон расположен так, что плоскость, проходящая через грани ветвей камертона, параллельна плоскости, проходящей через края отверстия резонаторного ящика (рис. 82), или указанные плоскости взаимно перпендикулярны, то звуковые колебания от обеих ветвей камертона приходят в одной фазе до внутренней полости резонаторного ящика. Волны усиливают друг друга, что повлечет за собой резкое усиление звука, излучаемого резонаторным ящиком. Если начать вращать камертон вокруг его оси  $OO_1$ , то звук, излучаемый ящиком, будет ослабевать. Особенно сильное уменьшение интенсивности звука будет наблюдаться тогда, когда угол между указанными плоскостями сделается равным  $45^\circ$  или  $135^\circ$ .

В этом случае колебания воздуха, поддерживаемые ветвями камертона, придут к внутренней полости резонаторного ящика почти полностью погашенными.

Опыт с вращением камертона следует повторить несколько раз и показать, что имеются четыре симметричных положения звучащего камертона по отношению к резонаторному ящику, когда звук резко ослабевает.

Рассматриваемый опыт допускает один интересный вариант. Расположим резонаторный ящик на демонстрационном столе так, как показано на рис. 83. Над отверстием ящика, на расстоянии примерно 6—9 см, экспериментатор держит звучащий камертон. Вращением камертона вокруг его оси симметрии находим положение, при котором звук, издаваемый ящиком, минимален. Затем экспериментатор надвигает на одну из ветвей камертона картонный цилиндр так, чтобы не коснуться им колеблющихся ветвей камертона. Теперь интерференция между волнами не происходит, и энергия звуковой волны, излучаемая только одной, неэкранированной ветвью камертона, будет достаточна для раскачки резонирующего объема воздуха. В момент экранирования слышится хорошо заметное в аудитории усиление звука. Опыт следует повторить несколько раз.

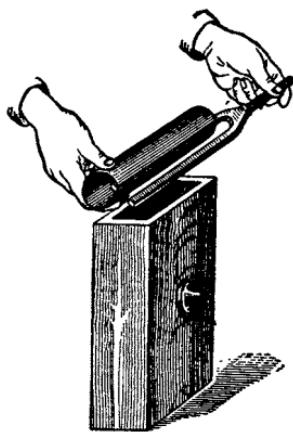


Рис. 83.

### 57. Звуки, возникающие при периодических толчках воздуха (дисковая сирена)

Сирена представляет собой металлический или картонный диск диаметром от 30 до 60 см с рядом небольших отверстий, расположенных на одной окружности диска на равных расстояниях друг от друга. Диск в центре укрепляется на оси центробежной машины или электромотора и приводится в равномерное вращение (рис. 84). Если вблизи отверстий вращающегося диска поместить трубку, через которую продувается довольно сильная струя воздуха, то поток воздуха будет периодически прерываться. При достаточном числе оборотов диска быстро следующие друг за другом толчки воздуха превратятся в непрерывный музыкальный тон. При увеличении числа оборотов диска высота звука повышается, при уменьшении — понижается. Часто на одном диске сирены

сверлят или пробивают не одну серию отверстий, а две или несколько, каждая из которых располагается на одной определенной окружности (рис. 84).

Рассмотрим сирену наиболее простого типа.

На четырех концентрических окружностях диска пробивают отверстия; числа отверстий находятся в отношениях  $2 : \frac{3}{2} : \frac{5}{4} : 1$ . Например, по окружности наибольшего

радиуса пробивают 96 отверстий, несколько меньшего 72, затем 60 и по окружности наименьшего радиуса 48. Приведем в равномерное вращение подобную сирену. Тон получаемого звука будет зависеть от положения трубки, сквозь которую продувается воздух: при продувании воздуха через отверстия, расположенные у самого края диска,

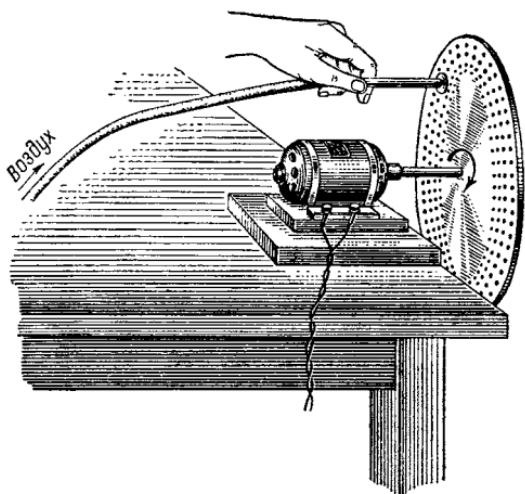


Рис. 84.

высота звука будет наибольшая; при продувании воздуха через отверстия наименьшей окружности тон звука будет на октаву ниже первого звука.

Полезен такой вариант опыта: демонстратор медленно проводит трубку со струей воздуха вдоль радиуса от центра диска к его краю и наоборот. Звуки, получаемые при таком движении, находятся в приятном для слуха сочетании (мажорный аккорд). Можно этот опыт проделать иначе: одновременно продувать воздух через четыре трубы, расположенные против отверстий каждой окружности диска.

Можно изготовить дисковые сирены, дающие полную мажорную гамму, минорные трезвучия и т. д. Следует подобрать несколько комбинаций отверстий на одном диске так, чтобы при продувании воздуха через одну серию

отверстий получался консонанс звуков, при продувании воздуха через другую серию — режущий слух диссонанс.

Предлагается еще другой вариант опыта с дисковой сиреной. По одну сторону вращающейся сирены располагается фотоэлемент, соединенный с усилителем низкой частоты и репродуктором, а по другую сторону — электрическая лампа, укрепленная в штативе на уровне створий какой-либо окружности сирены (рис. 85). Вследствие того что освещенность поверхности фотоэлемента будет периодически изменяться при вращении диска, токи, развивающиеся в цепи фотоэлемента, будут переменными, причем частота их будет равна частоте вращения диска, умноженной на число отверстий в диске. Репродуктор, включенный в цепь усилителя, будет звучать с указанной частотой.

Опыт следует разнообразить, передвигая электрическую лампу вдоль радиуса диска. Частота звука в этом случае будет меняться пропорционально числу отверстий на каждой окружности диска. В этом опыте лампу удобно держать в руке.

Опыт с дисковой сиреной и фотоэлементом интересен тем, что знакомит с принципом действия звукового кино.

Для постановки этого опыта необходимы: точечная электролампа (автомобильного типа), ламповый усилитель низкой частоты (например, усилитель типа У-50 \*), фотоэлемент (например, селеновый) и репродуктор.

Следует помнить, что селеновые фотоэлементы при сильном освещении теряют эмиссионные свойства.

\*) Номинальная мощность этого усилителя 50 вольтампер; чувствительность по микрофонному выходу 0.7—1.5 мв; напряжение на выходе усилителя 15, 30 и 120 в при соответствующих нагрузках 4,5; 18 и 200 ом.

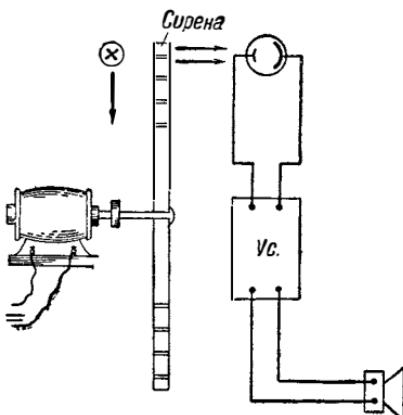


Рис. 85.

## 58. Ламповый генератор звуковой частоты

При изложении раздела «Акустика» в вузе часто приходится пользоваться для постановки лекционных опытов ламповым генератором звуковой частоты. В большинстве случаев применяются для этой цели звуковые генераторы, выпускаемые нашей электропромышленностью \*). Эти звуковые генераторы обладают хорошей частотной характеристикой \*\*) в значительном диапазоне звуковых частот и снабжены достаточно точной градуировочной кривой. В ряде опытов такие генераторы просто незаменимы (см. ниже).

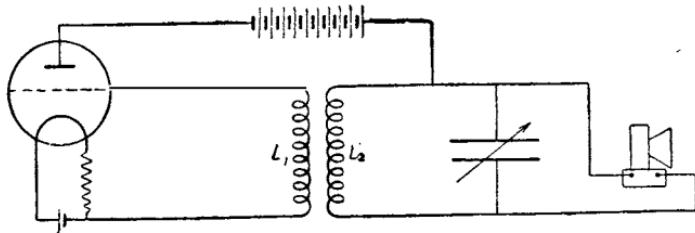


Рис. 86.

При рассмотрении всех известных способов получения звука рекомендуется показать в аудитории ламповый звуковой генератор, собранный по наиболее упрощенной схеме, детали которой непосредственно видны зрителям. На раскрытой установке легче вскрыть физическую сторону явления генерирования электрического тока звуковой частоты. Схем ламповых генераторов разработано весьма много. Приведем одну, наиболее простую лабораторного типа схему (рис. 86).

В схему входят следующие приборы: 1) электронная лампа типа УО-186 \*\*\*) ; 2) магазин емкостей на 10—

\*) См. Штурин Г. П., Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военно-морское издательство, М., 1950.

\*\*) Частотной характеристикой звукового генератора называется зависимость значений напряжений на выходном трансформаторе звукового генератора от частоты генерируемого им тока.

\*\*\*) См. Г. Г. Гинкин, Справочник по радиотехнике, Госэнергоиздат, М., 1948.

20 мкф, снабженный переключателем для постепенного увеличения емкости, включаемой в цепь генератора; 3) две большие цилиндрические разбитые на секции катушки самоиндукции  $L_1$  и  $L_2$  (см. ниже); 4) репродуктор; 5) реостат для регулировки силы тока накала лампы и 6) источники тока.

При правильно подобранный емкости и самоиндукции в цепи генератора репродуктор начинает звучать почти сейчас же после подачи на лампу генератора необходимого напряжения (напряжение накала 4 в, анодное напряжение 200—400 в). При изменении емкости или самоиндукции звукового генератора тон, издаваемый репродуктором, довольно резко меняется. Желательно так подобрать емкости колебательного контура, чтобы при последовательном скачкообразном изменении величины емкости звуки, получаемые от репродуктора, находились друг с другом в приятном гармоническом сочетании.

Если вводить в общий канал катушек  $L_1$  и  $L_2$  железный стержень, то по мере увеличения самоиндукции контура высота тона понижается. Для этой цели рекомендуется изготовить стержень из полос трансформаторного железа. Длина стержня примерно 40—50 см, а сечение определяется сечением канала катушек.

Катушки  $L_1$  и  $L_2$ , изготовленные для демонстрационного звукового генератора, имеют форму плоских цилиндров и намотаны на общий каркас. Примерные размеры: диаметр наибольшего витка каждой катушки 30 см, высота катушек 5 см, диаметр канала катушек 4 см, число витков в каждой катушке 1000.

Катушки выполнены звонковым проводом с диаметром 0,5 мм.

### 59. Звучащая дуга Петрова

Дуга Петрова обладает способностью не только развивать большую температуру и давать ослепительный свет, но при некоторых условиях она может звучать. При горении дуги Петрова в пространстве между ее углями скапливается значительное количество раскаленных газов и паров угля, которые весьма чувствительны к изменению

силы тока в цепи, питающей дугу. При изменениях силы тока в цепи раскаленные пары и газы пульсируют с частотой этих изменений. Если частота изменения тока в цепи лежит в интервале звуковых частот, то дуга Петрова выполняет роль телефона. Если перед дугой Петрова говорить, то звуковые колебания вызовут изменение давления в пространстве между углями, что повлечет за собою изменение режима горения дуги и тем самым повлияет на изменение силы тока в цепи дуги. При этих условиях дуга является микрофоном. В технике дуга в качестве микрофона и телефона не нашла себе распространения.

Для понимания физики процессов, протекающих в дуге Петрова, следует воспроизвести в аудитории опыт звучания дуги.

Рассмотрим наиболее удобный вариант этого опыта.

Установка (рис. 87) состоит из двух углей, закрепленных в держателе, переменного сопротивления  $R$  (примерно 100  $\text{ом}$ ), дросселя  $D$  (1—3 генри), катушки самоиндукции  $L$  и магазина емкостей  $C$  (примерно до 5  $\text{мкФ}$ ). Угли для этого опыта необходимо брать одинакового диаметра, примерно 5  $\text{мм}$ . Подобная установка присоединяется к цепи постоянного тока 120 в.

Уменьшив сопротивление  $R$  до 30—35  $\text{ом}$ , сводят угли. При удачном подборе емкости и самоиндукции в колебательном контуре дуга начинает издавать звуки. Для большей устойчивости горения дуги рекомендуется возбуждать ее при более высоких тонах звучания. Когда дуга загорится, рекомендуется сопротивление  $R$  увеличить до 70—80  $\text{ом}$ . При изменении емкости или самоиндукции колебательного контура тон звука резко меняется.

Полезен такой вариант опыта: железный стержень медленно вводится в катушку  $L_1$ . По мере увеличения самоиндукции колебательного контура тон звука, издаваемого дугой, понижается.

Эффект звучания можно усилить, приблизив к катушке  $L_1$  вторую катушку  $L_2$ , соединенную с репродуктором (рис. 87). Этот вариант опыта интересен тем, что непосредственно вскрывается причина звучания дуги

Петрова: периодическое изменение силы тока в колебательном контуре дуги.

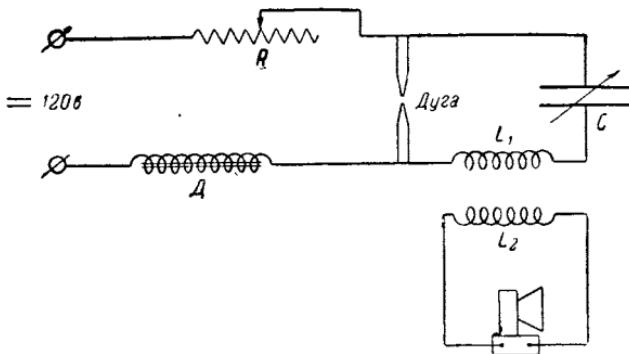


Рис. 87.

Катушки  $L_1$  и  $L_2$  следует изготовить в виде плоских колец. Их примерные размеры: внешний диаметр 13 см, внутренний диаметр 8 см, толщина катушки 4 см; число витков в каждой катушке 200—250. Такого вида катушки удобно индуктивно связать друг с другом, кроме того, с такой катушкой наглядно выглядит опыт введения в нее железного стержня.

## XI. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА

### 60. Пондеромоторное действие звуковых волн

Известно, что звуковые волны способны привести в движение легкие тела, на поверхность которых они падают. Явление усложняется, если эти тела способны резонировать на определенную частоту звуковых волн. Этот круг явлений изучался чешским физиком Дворжаком и знаменитым русским физиком профессором Московского университета П. Н. Лебедевым \*).

\*) См. статью П. Н. Лебедева «Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волны на резонаторы». Избранные сочинения П. Н. Лебедева, Гостехиздат, 1949.

Для демонстрации наиболее простого случая пондеромоторного действия звуковых волн — акустического отталкивания — рекомендуется показать следующий опыт.

Вблизи широкого отверстия резонатора Гельмгольца  $P$  (рис. 88), установленного на подставке, располагается камертон  $K$ , издающий тот же тон, на который настроен резонатор; на расстоянии 1,5—2  $мм$  от малого отверстия резонатора располагается небольшая бумажная вертушка  $A$  (колесо), опирающаяся в центре на стальную опору

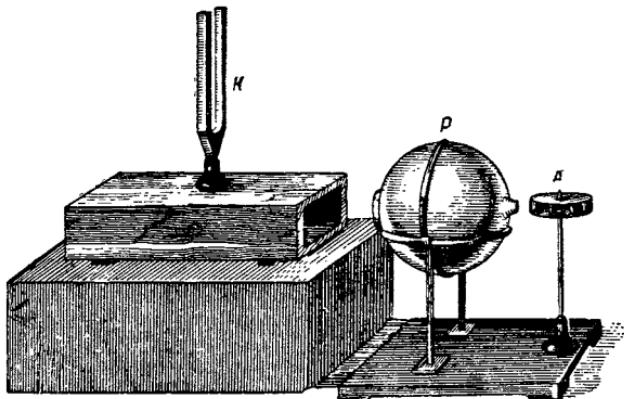


Рис. 88.

(иголку). При сильном звучании камертона выходящая из отверстия резонатора звуковая волна вызовет вращение вертушки. Вращение колеса будет более интенсивным, если вертушку расположить несимметрично на расстоянии 10—15  $мм$  от центра отверстия резонатора. Колесико вращается до тех пор, пока колебания камертона достаточно интенсивны. Если вертушку передвинуть и расположить ее по другую сторону от отверстия на расстоянии тех же 10—15  $мм$ , то колесико начнет вращаться в другую сторону.

Для лучшей видимости вращения вертушки рекомендуется нанести краской черту по верхней поверхности вертушки.

Этот опыт ставится в физическом кабинете МГУ с камертоном, частота которого 480  $гц$ .

*Практические замечания.* 1) Вертушка имеет вид плоского цилиндра, диаметр основания которого 40 *мм*, высота 7 *мм*. На боковой поверхности цилиндра расположены, на равном расстоянии друг от друга, 12 маленьких лопастей, несколько наклоненных к основанию цилиндра. В центре вертушки укреплена небольшая стеклянная трубка, запаянная с одного конца. В эту стеклянную трубку входит стальная опора прибора (см. рис. 88). Общий вес вертушки примерно 1—3 *Г*.

2) Если к резонатору поднести звучащий жамертон, сильно отличающийся по частоте от собственной частоты

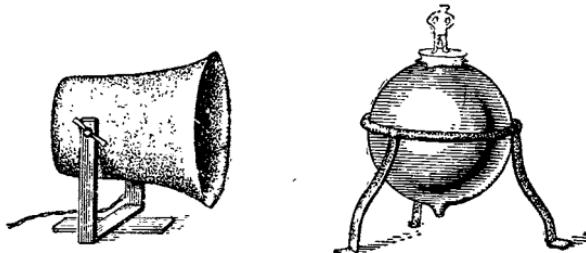


Рис. 89.

резонатора Гельмгольца, то вращение индикаторного колесика не будет наблюдаться.

Этот опыт можно поставить несколько иначе: ламповый звуковой генератор (через ламповый усилитель) возбуждает репродуктор (динамик). Вблизи репродуктора располагаются резонатор Гельмгольца и бумажная вертушка. Подбирая соответственно резонатору частоту колебаний звукового генератора, легко вызвать интенсивное вращение вертушки.

Рассматриваемому опыту можно придать такое оформление. Широкое основание резонатора Гельмгольца затягивается тонкой резиновой пленкой. Сам резонатор располагается на треноге так, чтобы закрытое резиной отверстие было обращено кверху (рис. 89). На резиновую пленку резонатора ставится легкая бумажная фигурка. Вблизи резонатора устанавливается репродуктор (динамик), возбуждаемый довольно мощным звуковым генератором (1—2 *вт*). Когда частота звука, издаваемого репродуктором, совпадет с собственной частотой резонатора, то воздух внутри резонатора начнет колебаться. Рези-

новая пленка и стоящая на ней фигурка начнут вибрировать. Если мощность излучения репродуктора достаточно велика, то явление акустического отталкивания можно демонстрировать с помощью акустического реактивного колеса (рис. 90).

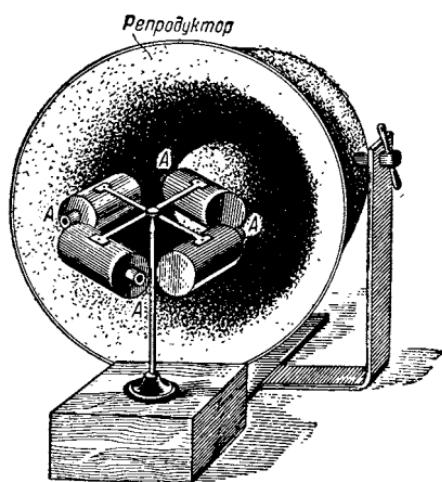


Рис. 90.

Этот прибор представляет собой вертушку из четырех легких металлических цилиндров *A*, подвешенных к концам легкого креста, центр которого имеет углубление для стальной опоры. Каждый цилиндр (резонатор) имеет в одном из оснований небольшое отверстие, обращенное в сторону сплошного основания соседнего цилиндра. Если поместить такую систему резонаторов в

звуковое поле сильно возбужденного репродуктора, то при определенной частоте излучателя она начнет вращаться. Опыт следует воспроизвести при разных частотах и показать, что при частотах, больших или меньших чем собственная частота резонатора, вращение «реактивного колеса» не наблюдается.

Примерные размеры резонаторов: длина 45 м.м., диаметр основания 30 м.м., диаметр отверстия 7 м.м. Вибраторы изготавливаются из тонкого алюминиевого листа.

### 61. Прибор для демонстрации скорости распространения воздушного импульса в металлической трубе (прибор Н. А. Умова)

Основной частью прибора является длинная латунная трубка, изогнутая в змеевик (рис. 91). Змеевик состоит из 33 оборотов, уложенных в три ряда. Общая длина всего змеевика довольно велика, примерно 80 м. Начало

и конец латунного змеевика выведены вверх. На расстоянии 10—12 мм от концов змесвика в латунную трубку впаяны, перпендикулярно к направлению витков, две небольшие газовые горелки. Горелки присоединяются через одну общую резиновую трубку к крану городской газовой сети. Начало змеевика оформлено в виде небольшого сужающегося наконечника, который присоединяется к груше пульверизатора; конец змеевика закрывается резиновой пробкой.

Демонстрация скорости распространения воздушного импульса осуществляется таким образом: сначала зажигают обе горелки, расположенные у концов змеевика; затем резко нажимают грушу пульверизатора. Воздушный толчок вызывает вздрагивание или даже погасание пламени, расположенного у входного отверстия змеевика. Через доли секунды (при мерно через 0,4—0,5 сек.)

вздрагивает или также погасает второе газовое пламя, расположенное у конца змеевика. Время между вздрагиванием первого и второго пламени соответствует времени распространения воздушного импульса в изогнутой латунной трубе. Зная величину этого промежутка времени и длину змеевика, можно приблизительно оценить скорость распространения звукового импульса. Необходимо подчеркнуть, что такой подсчет будет приблизительным, так как условия распространения звука в узкой металлической трубе несколько отличаются от условий распространения звука в естественных условиях.

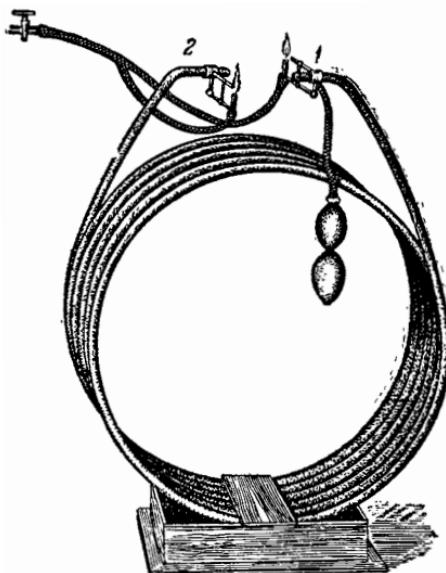


Рис. 91.

Некоторые конструктивные детали прибора Умова. Змеевик изготавляется из нескольких кусков тонкой латунной трубки, внешний диаметр которой  $\approx 17$  м.м. Латунные трубы изгибаются на деревянной круглой оправе, а затем сочленяются в один змеевик соединительными хорошо пригнанными муфтами. Места соединений хорошо прокрашиваются с внешней стороны краской в целях герметичности. Для упрочнения всей конструкции прибора соседние витки змеевика с внешней стороны спаяны между собою в нескольких местах. Змеевик устанавливается в небольшой устойчивый ящик, к которому он прикреплен деревянными планками (см. рис. 91). В таком виде прибор удобно хранить и передвигать.

Пламена горелок должны быть одинаковыми, примерно 20—25 м.м высотой.

Если при посылке импульса воздушной волны первое и второе пламена только вздрагивают («приседают»), то через долю секунды вторично вздрогнет пламя у входа в змеевик вследствие того, что воздушная волна отразилась от закрытого конца змеевика и прошла повторно весь змеевик в обратном направлении. Возможно повторное вздрагивание и второго пламени, расположенного у закрытого конца змеевика. Если опыт ставить так, что сразу воздушный импульс гасит пламя, то очевидно, что отраженная волна не будет аудиторией замечена. Для гашения пламени импульсом волны рекомендуется горелку так расположить, чтобы толчок воздуха подавался под основание пламени («под корень пламени»). Для этого в приборе предусматривается возможность несколько передвигать вверх и вниз газовые горелки по отношению к местам, где они присоединены к змеевику.

## 62. Определение скорости звука с помощью электронного осциллографа \*)

**Первый способ.** Для демонстрации этого опыта собирается следующая схема (рис. 92). Звуковой генератор З. Г. возбуждает репродуктор Р примерно на частотах

\*) См. книгу В. А. Красильникова «Звуковые волны», Гостехиздат, 1951.

800—1000 гц. Напряжение, снимаемое с звукового генератора, подается также на горизонтально отклоняющие пластины электронного осциллографа ЭО-4 или ЭО-5. Если это напряжение невелико и светлое пятно под действием его растягивается лишь в небольшую горизонтальную линию, то, используя усилитель низкой частоты, имеющийся в электронном осциллографе, напряжение звукового генератора следует усилить до такой величины, чтобы светлая полоса на экране растягивалась до половины или даже до  $\frac{2}{3}$  диаметра экрана.

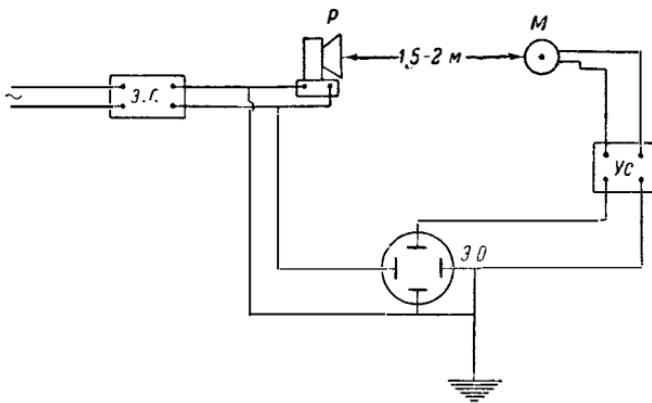


Рис. 92.

На расстоянии 1,5—2 м от звучащего репродуктора располагается на демонстрационном столе чувствительный микрофон *M*. Под действием звуковых волн, излучаемых репродуктором, в микрофоне возникнут токи. Напряжение, снимаемое с выходного трансформатора микрофона, подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа. Так как микрофонное напряжение всегда незначительно (доли вольта), то его необходимо увеличить в десятки, а иногда и в сотни раз. Если коэффициент усиления вертикального усилителя электронного осциллографа невелик, то необходимо поставить еще добавочный промежуточный усилитель низкой частоты, как это показано на рис. 92. При этом следует добиться того, чтобы светлое пятно на экране растягивалось по

вертикали на ту же длину, как и по горизонтали. При одновременном воздействии на электронный пучок двух взаимно перпендикулярных синусоидальных напряжений (от микрофона и от звукового генератора) светлая линия на экране описывает одну из фигур Лиссажу, соответствующую сложению двух гармонических колебаний одного периода: прямую линию, круг или эллипс (см. демонстрацию «Сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний на электронном осциллографе»).

Теперь начнем медленно приближать репродуктор к микрофону или микрофон к репродуктору (удобнее приближать микрофон) по линии, соединяющей центр диффузора репродуктора с центром микрофона. При таком передвижении светлая фигура на экране осциллографа начнет видоизменяться. Передвижение микрофона следует прекратить тогда, когда фигура на флюоресцирующем экране превратится в прямую линию, наклоненную к горизонтали под углом в  $45^\circ$ . В этом случае микрофон воспринимает звуковые волны в той же фазе, в какой они излучаются диффузором репродуктора. Отметим это положение на демонстрационном столе или лучше просто измерим линейкой расстояние между репродуктором и микрофоном. Затем продолжим приближение микрофона к репродуктору до тех пор, пока фигура на экране осциллографа после непрерывного ее видоизменения снова превратится в прямую линию, наклоненную к горизонту под углом  $45^\circ$ . Вновь измерим расстояние между микрофоном и репродуктором. Разность измеренных расстояний равна длине звуковой волны. Умножая длину звуковой волны на частоту звука, отсчитанную по шкале звукового генератора  $3. Г.$ , определим скорость звука в воздухе при комнатной температуре.

Опыт можно демонстрировать в трех вариантах.

1) Микрофон располагается на таком расстоянии от репродуктора, чтобы светлое пятно на экране описало прямую линию, наклоненную к горизонту под углом  $45^\circ$ . Затем плавно изменяется (увеличивается или уменьшается) частота звукового генератора. При этом непрерывно изменяется фаза между излучаемыми и принимаемыми звуковыми волнами, что вызывает видоизменение картины

на экране осциллографа. Линия превратится в овал, который сначала расширяется, затем сужается. Прекратим изменение частоты звукового генератора в тот момент, когда овал вновь стягивается в прямую линию, наклоненную к горизонту под углом  $45^\circ$ . В этом случае вновь в пространстве между репродуктором и микрофоном уложится целое число звуковых волн. Несложные рассуждения приводят нас к формуле для определения скорости звука при комнатной температуре:

$$c = \Delta\nu \cdot L,$$

где  $\Delta\nu$  — изменение частоты звука, оцененное по шкале звукового генератора,  $L$  — расстояние между репродуктором и микрофоном.

2) Восстановим вновь начальные условия опыта. Теперь с помощью фена (небольшая воздуходувка) начнем продувать воздух между микрофоном и репродуктором. В этом случае среда между излучателем звуковых волн и приемником перестанет быть однородной. Флуктуация плотности воздуха в этом пространстве вызовет изменение условий распространения звуковой волны, что повлечет за собой изменение фазы между напряжениями, подаваемыми на горизонтально отклоняющие и вертикально отклоняющие пластины осциллографа. Внешне это проявится в беспорядочном движении следа электронного пучка по экрану.

3) Подобные произвольные изменения светящейся фигуры на электронном осциллографе можно наблюдать, если воздух между репродуктором и микрофоном начать подогревать. Для этого достаточно расположить зажженную газовую горелку на середине расстояния между репродуктором и осциллографом, несколько ниже линии, соединяющей середины этих приборов.

*Практические замечания.* 1) Все соединения в схеме, изображенной на рис. 92, желательно производить бронированным кабелем, металлическая оболочка которого заземляется.

2) Осциллограф должен быть хорошо экранирован с целью устранения возможных наводок напряжения городской сети.

3) Фигуры, получаемые на экране, должны быть четкими. Раздвоение их свидетельствует о наличии в цепи каких-то электрических помех.

**Второй способ.** На расстоянии 1—2 м от репродуктора, соединенного со звуковым генератором, располагаются рядом два микрофона (рис. 93). Микрофоны присоединяются ко входным клеммам лампового усилителя (например, У-50), выход которого подан на вертикально склоняю-

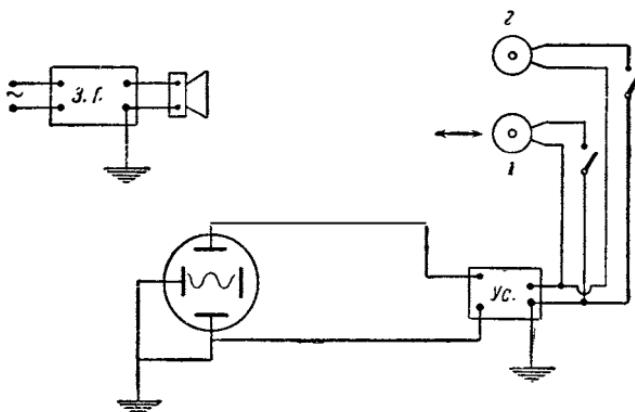


Рис. 93.

щие пластины электронного осциллографа (ЭО-4 или ЭО-5). Под действием электродвижущей силы, являющейся суммой двух электродвижущих сил, возникающих в первом и во втором микрофонах, светлое пятно на экране осциллографа превращается в вертикальную линию. Пользуясь усилителями, имеющимися в схеме, светлую полосу на экране растягиваем примерно на  $\frac{2}{3}$  его диаметра. Затем, немного приближая к репродуктору или удаляя от него один из микрофонов, добиваемся максимального растяжения светлой полосы на флюоресцирующем экране при неизменной степени усиления микрофонных токов. Эта проверка убеждает аудиторию в том, что электродвижущие силы, возникающие в микрофонных цепях, находятся в фазе. При включении генератора горизонтальной развертки график изменения суммарной электродвижущей силы во времени изобразится в виде

синусоиды. Необходимо так подобрать частоту пилообразного напряжения, чтобы на экране уложились две-три полные синусоиды (см. демонстрацию «Наблюдение колебаний электронного пучка»).

Если теперь начать приближать один из микрофонов по направлению к репродуктору, то синусоида, полученная на экране осциллографа, начнет изменяться как в отношении фазы, так и по амплитуде. Когда микрофон будет приближен к репродуктору на половину длины получаемой им волны, то синусоида на экране превратится в прямую линию. При дальнейшем передвижении микрофона в том же направлении прямая линия вновь сделается синусоидой, которая будет несколько видоизменяться при движении микрофона, пока в конце концов не превратится в синусоиду с максимальной амплитудой, т. е. в начальную синусоиду. В этом случае расстояние между микрофонами равно длине звуковой волны.

Можно не приближать микрофон к репродуктору, а, наоборот, удалять его.

Опыт можно провести на разных частотах.

Замечания, высказанные нами по поводу первого способа постановки опыта «Определение скорости звука с помощью электронного осциллографа», остаются в силе и для этого варианта.

### 63. Возрастание скорости звука в воздухе при повышении температуры

Зависимость между длиной стоячей волны, возникающей в органной трубе, и скоростью распространения звука в воздухе выражается следующими соотношениями:

для открытой трубы  $4Ly = v$ ,

для закрытой трубы  $2Ly = v$ ,

где  $L$  — длина органной трубы,  $\nu$  — частота и  $v$  — скорость распространения звука в воздухе при определенной температуре.

Так как температура воздуха при продувании его через трубу практически не изменяется, то высота основ-

ногого тона, издаваемого трубой, зависит лишь от длины трубы. Если же каким-либо способом нагреть воздух внутри органной трубы, то тон звука должен повыситься. Это повышение тона звука может явиться качественным подтверждением увеличения скорости распространения звука в воздухе при повышении его температуры. В целях большей наглядности этого опыта при демонстрировании его на лекции прибегают к методу биений.

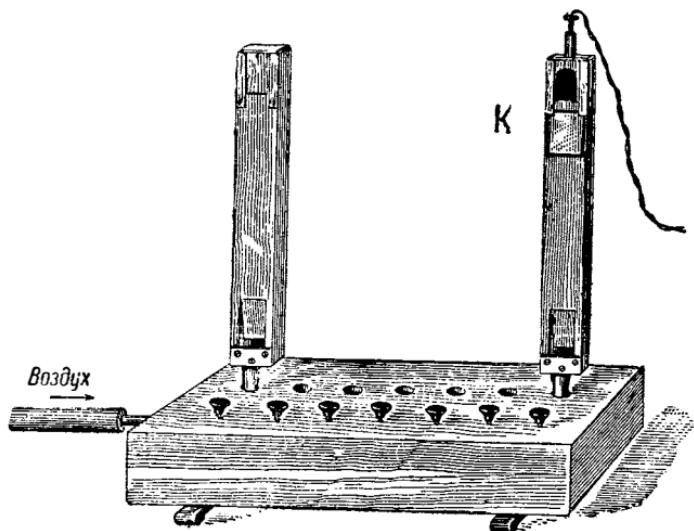


Рис. 94.

Две открытые органные трубы одного тона устанавливаются в отверстиях органного столика (рис. 94). Боковое отверстие столика толстым резиновым шлангом соединяется с органным мехом или с пылесосом, переделанным для нагнетания воздуха.

Для равномерного продувания воздуха через органные трубы рекомендуется между органным столиком и аппаратом для продувания воздуха поставить металлический бак или стеклянную бутыль. Наличие бака емкостью 20—30 л обеспечит более равномерную подачу воздуха к органному столику и тем самым ровное звучание органных труб.

Внутрь обеих труб вводятся стеклянные трубки несколько большей длины, чем органная труба. На одной из них в нижней части наложена спираль из никрома. Спираль от сети переменного тока может быть прогрета до температуры 250—300°.

Введение внутрь органных труб стеклянных трубок может вызвать акустическую расстройку последних. Это обстоятельство необходимо проверить до нагревания спиралей. Проверка ведется следующим образом: вызывается одновременное звучание органных труб; в случае расстройки органных труб появляются звуковые биения. Для получения звучания труб в унисон необходимо несколько передвинуть заслонку  $K$  (см. рис. 94) у одной из органных труб. Далее можно приступить к демонстрированию самого опыта.

Демонстратор вызывает одновременное звучание органных труб в течение нескольких секунд и обращает внимание зрителей на то, что трубы звучат в унисон. Затем включается электрический ток в спираль, находящуюся в одной из органных труб. Спираль нагревается и обогревает окружающий ее воздух. Вследствие увеличения скорости распространения звука в нагретом воздухе тон звука, получаемый от этой трубы, будет выше первоначального. Изменение тона особенно заметно, если продувать одновременно воздух через обе трубы; возникшие акустические биения обнаружат указанное изменение тона. Биения совершенно отчетливо слышны в аудитории. Частота биений увеличивается по мере возрастания температуры воздуха в трубе с нагревателем. Выключив ток, улавливаем уменьшение частоты биений.

В целях большей убедительности опыта рекомендуется продувать воздух через обе органные трубы после выключения тока, до тех пор пока воздух в обеих трубах не будет иметь одну и ту же температуру и трубы вновь не будут звучать в унисон.

Демонстрация имеет один существенный недостаток. Биения могут возникать в равной степени при уменьшении и при увеличении скорости распространения звука в одной из труб. Поэтому, строго говоря, в таком виде демонстрация дает возможность установить лишь факт

изменения скорости распространения звука с изменением температуры воздуха.

*Практические указания.* 1) Во избежание неравномерного нагрева рекомендуется на стеклянную трубку наложить тонкий слой асбеста или слюды. Сопротивление нагревателя примерно 50—60 о.м. В этом случае нагреватель может включаться непосредственно в городскую осветительную сеть 120 в.

2) Нагреватель в верхней и нижней частях снабжен проволочными держателями; назначение последних — удерживать нагреватель внутри органной трубы навесу и не допускать нигде касания его с деревянными стенками трубы.

#### 64. Скорость звука в различных газах

Для демонстрации изменения скорости звука с изменением состава газа, в котором звук распространяется, можно воспользоваться методикой, описанной в предыдущей демонстрации.

Две одинаковые органные трубы с закрытыми концами устанавливаются на органном столике (рис. 95). Перед опытом необходимо убедиться, что органные трубы настроены в унисон. Небольшое изменение тона трубы в случае необходимости можно произвести передвижением поршня *n*, являющегося одновременно и крышкой органной трубы.

Продемонстрировав слушателям звучание органных труб в унисон, впускают при помощи тонкой резиновой трубы светильный газ внутрь одной из них. Для этого резиновая трубка, соединенная с краном городской газовой сети, вводится через боковое отверстие в органную трубу и кран газовой сети открывается на 3—4 сек., затем трубку удаляют. Пропущенного таким способом газа вполне достаточно для обнаружения различия в скорости распространения звука.

Светильный газ легче воздуха, он поднимается вверх и заполняет всю внутреннюю полость трубы. Сейчас же по заполнении трубы светильным газом экспериментатор вызывает звучание обеих труб. Вследствие того что в

светильном газе звук распространяется с большей скоростью, чем в воздухе, тон трубы, заполненной светильным газом, будет выше, чем тон трубы того же размера, но заполненной воздухом.

При одновременном звучании этих труб возникают акустические биения. Однако частота этих биений будет постепенно уменьшаться, так как при продувании воздуха через трубу, заполненную светильным газом, количество последнего будет постепенно убывать, а вместе с этим и скорость звука внутри этой трубы будет приближаться

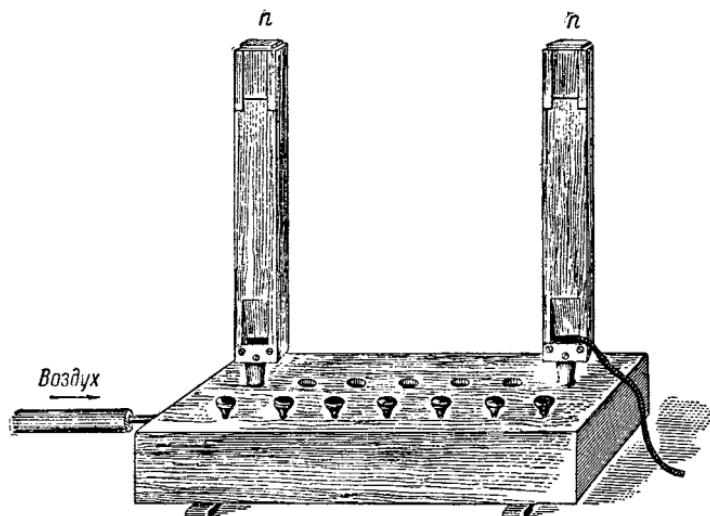


Рис. 95.

к скорости звука в воздухе. Через несколько минут (1—2) звучащие трубы будут давать звук одного тона, и биения исчезнут.

Опыт следует повторить два раза.

При демонстрировании этого опыта методом биений невозможно обнаружить, где скорость распространения звука больше, в воздухе или в светильном газе. Опыт демонстрирует лишь различие скоростей распространения звука в разных газах.

## 65. Звукопроводность твердых и жидких тел

Камертон снимается с резонаторного ящика, а вместо него, перпендикулярно к верхней поверхности ящика, ставится деревянный стержень длиной 30 см и диаметром примерно 8—10 мм. Если теперь возбужденный камертон опустить стеблем на верхний конец стержня (рис. 96),

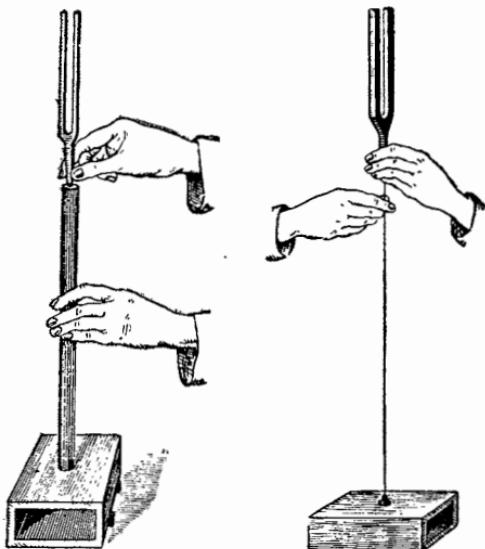


Рис. 96.

Рис. 97.

то звучание камертона резко усиливается. Опыт свидетельствует о том, что колебания камертона передаются через деревянный стержень довольно хорошо.

Весьма поучителен следующий опыт. Сквозь отверстие в резонаторном ящике, предназначенное для укрепления стебля камертона, пропускают веревку. Пропущенный конец веревки завязывается узлом, так что за

второй конец веревки можно поднять резонаторный ящик (рис. 97). Если возбужденный камертон прижать к свободному концу веревки, то звучание камертона заметно усиливается. Опыт убеждает слушателей в звукопроводности веревки.

Опыт можно несколько видоизменить. Экспериментатор держит одной рукой резонаторный ящик, сквозь отверстие которого пропущена веревка, а в другой руке держит камертон, к стеблю которого привязан второй конец веревки (рис. 98). В течение нескольких секунд аудитория прислушивается к звучанию камертона. Затем экспериментатор разводит руками и тем самым натягивает веревку — звук сейчас же заметно усиливается; при ослаблении натяжения звук ослабевает.

Для демонстрации звукопроводности жидкостей поступают таким образом. Камертон снимается с резонаторного ящика, а вместо него ставится мензурка или

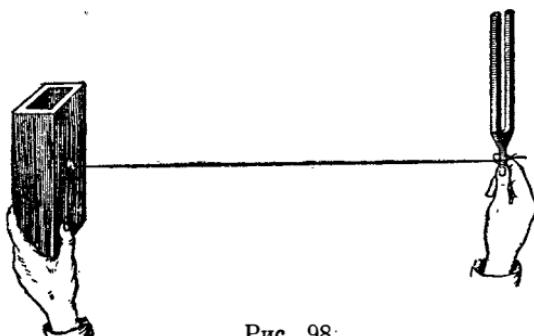


Рис. 98.

стакан, наполненный водой. На стебель камертону надевается корковая или деревянная пробка, диаметр которой на 1—2 см меньше внутреннего диаметра сосуда. Далее возбужденный камертон опускается в мензурку с водой так, чтобы пробка погрузилась в воду на 1—2 см (рис. 99). При этом погружении звучание усиливается, что свидетельствует о звукопроводности воды и сосуда.

Следует опыт повторить в таком виде. Экспериментатор возбуждает камертон и производит поочередно две операции: сначала касается пробкой, насаженной на стебель камертона, края стеклянного сосуда, а затем сейчас же опускает ее на воду. Звучание камертона во втором случае сильнее, чем в первом. Это сравнение убеждает аудиторию в том, что явление усиления звука при погружении камертона в воду определяется не только звукопроводностью стенок сосуда, но и хорошей звукопроводностью жидкости, заполняющей сосуд.

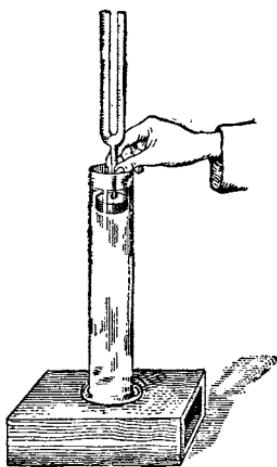


Рис. 99.

## ХII. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ЗВУКА И ЕГО АНАЛИЗ

### 66. Измерение силы звука

Силой, или интенсивностью, звука принято называть количество энергии, которое падает за каждую секунду на 1  $\text{см}^2$  площади, расположенной перпендикулярно к направлению распространения волны. Экспериментально измеряется не эта величина, а одна из величин, связанная с силой звука: скорость колебания частиц среды или звуковое давление волны.

При измерении первой величины применяется прибор, называемый диском Рэлея. Этот прибор представляет собой сплюснутый диск, подвешенный на очень тонкой нити. При падении на диск звуковой волны вследствие неравномерного обтекания его волной диск поворачивается; угол поворота диска оценивается с помощью маленького зеркальца, прикрепленного к диску.

По величине крутящего момента можно определить скорость частиц воздуха, а по скорости рассчитать силу звуковой волны. Такое измерение следует назвать абсолютным \*). В связи с этим следует показать опыт обтекания диска потоком воздуха (см. опыт «Диск Рэлея» в книге «Лекционные демонстрации по физике», вып. 2, стр. 104).

В измерительной технике прибегают к относительному методу определения силы звука, сопоставляя его при градуировке с абсолютным. Относительные измерения силы звука часто проводятся с помощью микрофона, в цепь которого включается измерительный прибор. В этом случае показания прибора пропорциональны давлению звуковой волны, падающей на мембрану микрофона. Эти измерения можно проводить по следующей схеме (рис. 100): электродинамический микрофон  $M$  присоединяется к входным клеммам лампового усилителя низкой частоты, а выходные клеммы усилителя — через купроакс-

---

\*) См. книгу В. Д. Зернова «Абсолютное измерение силы звука», Москва, 1909.

ный выпрямитель к демонстрационному вольтметру или миллиамперметру. Перед микрофоном располагается звучащий камертон. Вследствие возникновения в микрофонной цепи электродвижущей силы, величина которой,

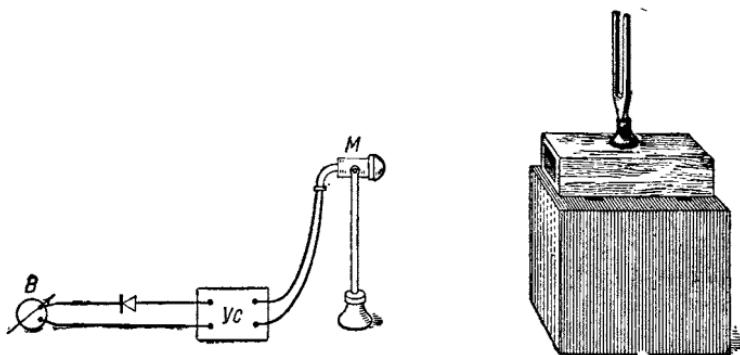


Рис. 100.

как известно, пропорциональна давлению звуковой волны, стрелка демонстрационного вольтметра дает отклонения. Величина отклонения стрелки будет зависеть от интенсивности колебаний камертона и от расстояния между камертоном и микрофоном. Обе зависимости необходимо порознь демонстрировать в аудитории. При чувствительном микрофоне и достаточном усилении микрофонных токов ламповым усилителем даже слабое звучание камертона дает значительные отклонения стрелки вольтметра.

Опыт необходимо варьировать, вызывая перед микрофоном различные звуки: хлопание в ладоши, стук падающих на пол предметов, речь, пение, звук какого-либо музыкального инструмента, звучание репродуктора, соединенного со звуковым генератором, и т. д.

Если звуки отрывистые (удар, шум падающего предмета, хлопок и пр.), то стрелка демонстрационного вольтметра дает один резкий отброс и возвращается к начальному положению. Длительные и постоянные по интенсивности звуки вызывают более или менее устойчивое отклонение стрелки прибора. Человеческая речь дает колебание стрелки вольтметра.

Если в распоряжении физического кабинета имеется достаточно мощный усилитель, с помощью которого можно получить на выходе 80—100 в (при микрофонном напряжении 0,5—1,5 мв), то вместо демонстрационного вольтметра можно взять лампу накаливания или неоновую лампу. При разгреве или пении перед микрофоном лампы будут вспыхивать пропорционально силе звука.

При параллельном включении двух ламп, лампы накаливания и лампы тлеющего разряда, отчетливо проявится тепловая инерция первой лампы.

Яркость свечения неоновой лампы пропорциональна в конечном счете силе звука, поэтому в течение некоторого времени неоновая лампа имела применение в технике звукозаписи. В последнее время неоновая лампа из этой области техники вытеснена другими, более чувствительными и удобными, аппаратами: осциллографом и др. В демонстрационном отношении неоновая лампа в подобных схемах весьма наглядна.

Схема с демонстрационным вольтметром или миллиамперметром на выходе может быть использована для численного сравнения силы звука от различных источников. Однако вследствие того, что чувствительность микрофонов не одинакова к звукам различной частоты (непрямолинейная частотная характеристика микрофона), подобное сравнение звуков, строго говоря, справедливо лишь для источников одинаковой частоты.

Для постановки этих опытов следует взять: 1) электродинамический микрофон типа «РДМ», выпускаемый нашей промышленностью \*), 2) магнитоэлектрический демонстрационный вольтметр на 10—30 в, 3) усилитель низкой частоты, например У-50, и 4) измерительный купроксный выпрямитель.

Электродинамический микрофон «РДМ» обладает следующими данными: полоса воспроизводимых частот 100—5000 гц; средняя чувствительность микрофона — не ниже 0,25 мв/бар при сопротивлении 600 ом выходного микрофонного трансформатора.

---

\*) Этот микрофон предназначен для речевых передач в студиях трансляционных центров.

Опыт можно поставить несколько иначе. Выход усилителя соединяется с клеммами вертикальных пластин электронного осциллографа \*) (рис. 101). В этом случае

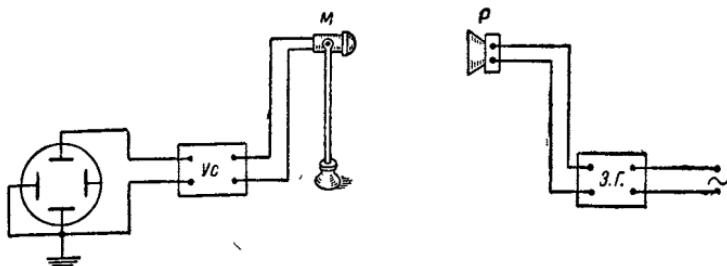


Рис. 101.

вертикальное смещение светлого пятна на экране осциллографа будет характеризовать силу звука, воспринимаемого микрофоном. Если включить генератор развертки осциллографа, то можно проанализировать спектральный состав звука (подробно об этом см. ниже).

## 67. Тембр звука

Однотонное звучание двух различных источников звука (камертона и органной трубы, струны и человеческого голоса и т. д.) убеждает аудиторию в том, что звуки одной частоты могут отличаться друг от друга своей выразительностью, большей или меньшей мягкостью или резкостью. Даже не искушенный в музыке слушатель уловит на слух «качественное» различие воспроизведенных звуков, т. е. различие по тембру.

Сравнение звуков по тембру можно произвести в демонстрационных целях таким способом. Два репродуктора разных систем присоединяются по очереди к звуконосному ламповому генератору (рис. 102). При быстром

\*) Если осциллограф снабжен ламповым усилителем, как это имеет место в осциллографах ЭО-4 или ЭО-5, то в промежуточном усилителе необходимость отпадает.

переключении репродукторов аудитория легко заметит различие в тембре звука, воспроизведенного одним и другим репродукторами.

Можно подобное переключение производить не с двумя, а с тремя или даже четырьмя репродукторами. Для этого опыта существенно иметь репродукторы, отличающиеся друг от друга частотными характеристиками.

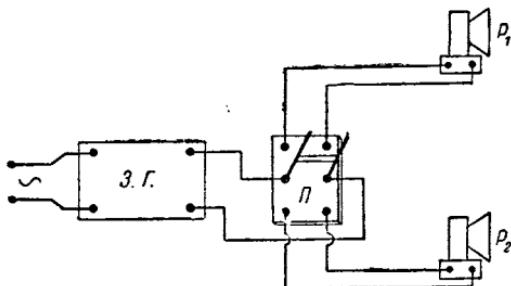


Рис. 102.

Желательно в этом опыте сравнивать звуки одинаковой силы. Оценить силы сравниваемых звуков можно либо на слух, либо с помощью одного из объективных методов.

При втором способе поступают таким образом. Микрофон через усилитель низкой частоты присоединяется к демонстрационному вольтметру, затем по очереди на равных расстояниях от микрофона располагают репродукторы, воспроизводящие один и тот же тон. При различных показаниях вольтметра включают добавочное сопротивление в цепь того репродуктора, который при своем звучании дает большие микрофонные токи \*). Подобное выравнивание силы звука можно осуществить даже в аудитории (см. выше демонстрацию «Измерение силы звука»).

Полезно показать опыт сравнения звуков по тембру при звучании репродукторов как на высоких, так и на низких тонах.

\* ) Можно этот репродуктор шунтировать.

## 68. Высота звука

Высота звука и ее зависимость от числа колебаний в секунду демонстрируются различными способами. Некоторые из них уже рассмотрены нами в разных разделах настоящего сборника, поэтому ограничимся здесь лишь перечислением, а в некоторых случаях кратким разбором этих приемов. В заключение обратим внимание читателя на один наиболее современный в техническом отношении способ демонстрирования этого явления.

Понятие «высота звука» иллюстрируется с помощью зажатой в тиски тонкой пружины, длина которой постепенно уменьшается; на струне, натяжение которой при помощи винта изменяется; на камертонах разного размера; на органных трубках разных длин и т. д. Во всех этих случаях высота получаемого звука сопоставляется или с размерами звучащего тела или с его упругими свойствами.

Более ясное представление о высоте звука аудитория получает из демонстрации различного типа сирен. Возьмем для примера наиболее простую сирену — сирену Савара, представляющую собой небольшой диск с зубцами, нанесенными по его краю. Диск насажен на небольшой стержень. При равномерном вращении такой сирены на центробежной машине легко вызвать звук, касаясь зубцов сирены небольшой картонной пластинкой. Вибрирующая пластинка издает звук, частота которого равна произведению из числа зубцов, нанесенных по краю диска, на число оборотов диска в секунду. Высота тона изменяется при изменении числа оборотов центробежной машины.

Весьма часто на одной оси закрепляется несколько дисков, на краях которых нанесено различное число зубцов (рис. 103). Обычно отношения чисел зубцов дисков выражаются простыми числами:  $4 : 5 : 6 : 8$  и т. д. В этом случае, передвигая пластинку вверх и вниз у края вращающейся стопы дисков, мы последовательно будем получать звуки различных высот. Если касаться пластинкой зубцов всех дисков одновременно, то возникнет сложный звук, являющийся более или менее гармо-

ничным сочетанием нескольких звуков разных частот. Такого рода опытами легче убедить аудиторию в том, что высота звука определяется частотой вибраций звучащего тела.

Эту связь можно показать с помощью звукового лампового генератора и электронного осциллографа. Для

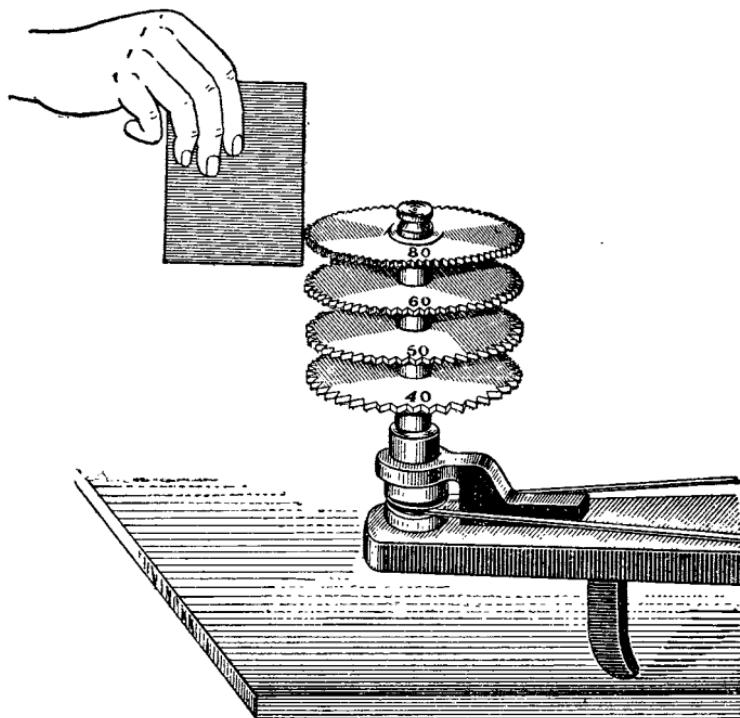


Рис. 103.

этого собирается схема, изложенная на рис. 104. Звуковой генератор с плавным регулятором частот возбуждает репродуктор. Напряжение от звукового генератора подается также на вертикально отклоняющие пластины электронного осциллографа. Пользуясь регулятором мощности звукового генератора и регулятором усиления вертикального усилителя электронного осциллографа, све-

товое пятно на экране осциллографа следует растянуть на  $\frac{1}{2}$ — $\frac{2}{3}$  диаметра экрана. Пользуясь регулятором смещения электронного пучка, выведенным на переднюю панель осциллографа, светлую вертикальную полосу сдвигают несколько влево от центра экрана. Далее медленно изменяют частоту звучания репродуктора, начиная от низких частот и кончая относительно высокими. Если звуковой генератор обладает хорошей частотной характеристикой, то, несмотря на резкое изменение тона, длина светлой полосы по вертикали будет оставаться на экране неизменной. Следует избегать заходить в область самых низких и самых высоких частот, получаемых от звукового генератора, так как на концах частотной характеристики почти любого генератора наблюдается отклонение от прямолинейности.

Затем включается генератор горизонтальной развертки с частотой развертки примерно 40—50 гц, и опыт повторяется

вновь, начиная его с возбуждения репродуктора наиболее низкими тонами. Теперь светлая полоса на экране превратится в синусоиду. Число периодов синусоиды, уложившихся по горизонтали, будет увеличиваться по мере повышения тона звука. При высоком тоне звука число периодов, уложившихся на экране, будет настолько велико, что с трудом можно различить очертания отдельной синусоиды. Издали световой рисунок на экране кажется просто прямоугольником, заштрихованным светлыми линиями.

Очевидно, что частоту развертки осциллографа не следует менять в процессе изменения частоты звука. При такой постановке опыта совершенно ясно, что высота звука определяется числом колебаний звучащего тела в секунду.

Следует иметь в виду, что получаемые синусоидальные кривые могут смещаться в ту или иную сторону, если частота электрических колебаний, подаваемых на верти-

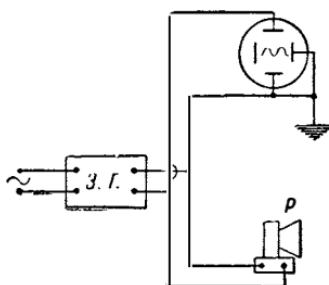


Рис. 104.

кальные пластины, не в целое число раз больше частоты горизонтальной развертки. Для того чтобы устранить это неудобство, следует в этом случае изменять частоту звукового генератора не плавно, а небольшими скачками, задерживая внимание аудитории в моменты, когда картина на экране будет неподвижной.

Если электронный осциллограф снабжен графиком горизонтальной развертки, то легко определить частоту звука, воспроизведенного репродуктором. Для этого необходимо перемножить частоту развертки, при которой ведется эксперимент, на число синусоид, уложившихся по горизонтали флюоресцирующего экрана осциллографа.

### 69. Демонстрационный прибор для анализа звуковых колебаний, сконструированный П. Н. Лебедевым \*)

Тонкая пробковая мембрана  $M$  в двух картонных кольцевых прокладках зажата гайками между двумя металлическими кольцами  $P$  и  $P_1$  (рис. 105). К одному из колец привинчивается рупор  $T$ . С задней стороны прибора (со стороны, противоположной отверстию рупора) вблизи пробковой мембранны располагается тонкое легкое зеркало  $Z$ . Это зеркало с легким трением входит в прорезы трех пробковых пластинок  $a$ ,  $b$  и  $c$ , из которых одна  $c$  укреплена в центре пробковой мембранны и поддерживает зеркало снизу, а две другие пластиинки,  $a$  и  $b$ , крепят зеркало с боков. Эти пластиинки прикрепляются к металлической раме  $\Gamma$ , расположенной примерно на расстоянии 15 мм от пробковой мембранны. Рама  $\Gamma$  снизу снабжена легкой плоской пружиной  $\Phi$ , которую с помощью винта  $B$  можно слегка передвинуть и тем самым поставить зеркальце приблизительно параллельно мембрane. Если на мембранны прибора падает звуковая волна, то колебания мембранны вызовут соответствующий поворот зеркала около оси  $ab$ . Применение пробковой мембранны в приборе для анализа звука оправдывается почти полным отсутствием собственных колебаний мембранны.

\*) П. Н. Лебедев впервые демонстрировал этот прибор на IX съезде естествоиспытателей и врачей в Москве.

Прибор укреплен на массивном штативе. В конструкции предусмотрена возможность вращать прибор в штативе вокруг горизонтальной и вертикальной осей, а также поднимать и опускать его вдоль вертикального стержня штатива.

Для демонстрации и анализа звуковых колебаний на приборе Лебедева собирается установка, описанная нами в демонстрации «Запись колебаний электрокамертона на экране».

Сам П. Н. Лебедев рекомендует этот прибор демонстрировать таким образом\*): «На фонарь, из которого вынуты всестекла, надета диафрагма  $\mathcal{D}$  с малым отверстием (см. рис. 106); на большом черном экране, в который вставлена ахроматическая линза  $L$ , получается обратное изображение электрической дуги, причем так, что кратер положи-

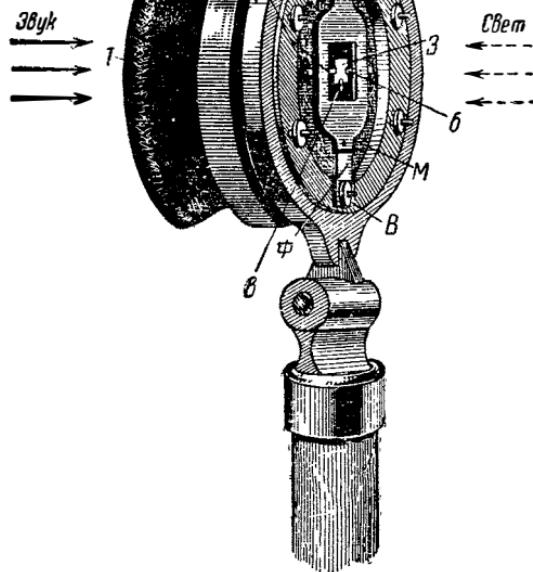


Рис. 105.

тельного угла проектируется на середину линзы — это условие необходимо, чтобы свету было достаточно, и за ним приходится следить во время опыта. Дальнейший ход лучей обусловливается расположением приборов в зависимости от условий в аудитории.

\*). См. статью П. Н. Лебедева «Прибор для проложения звуковых колебаний» в Журнале Русского физико-химического общества, часть физическая, т. XXVI, вып. 1, 1894.

Скорость вращения зеркала легко регулировать так, чтобы волна не была ни слишком растянута, ни слишком сжата».

С помощью этого прибора П. Н. Лебедев рекомендует демонстрировать следующие опыты:

1) Сила звука. Перед рупором прибора ставится на разных расстояниях звучащий камертон и на экране демонстрируются синусоиды различных амплитуд.

Если не изменять расстояние между рупором и камертоном, то можно наблюдать затухание колебаний во времени.

2) Высота звука. Перед рупором прибора последовательно располагаются возбужденные ударом молотка камертоны разных тонов и по-

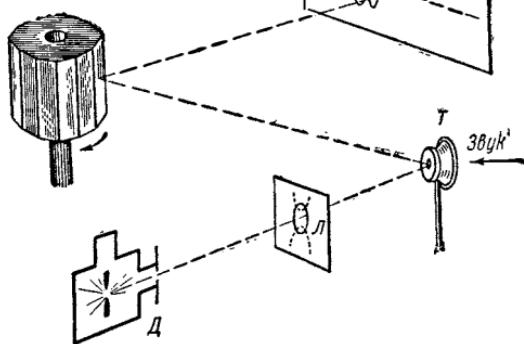


Рис. 106.

лучаемые кривые сравниваются между собой. Ввиду того что получаемые кривые демонстрируются на экране не одновременно, рекомендуется для большей убедительности в каждом случае подсчитывать число периодов синусоиды, уложившихся на одном и том же горизонтальном отрезке экрана.

3) Наложение друг на друга звуковых волн. Демонстрируется одновременное звучание камертонов разных тонов перед рупором прибора.

4) Тембр звука. Звучание перед рупором прибора последовательно камертона, органной трубы, струны и т. д.

5) График гласных звуков, произнесенных на разные тона.

6) Пение перед рупором прибора.

7) Разговорная речь.

К недостаткам прибора следует отнести некоторую гигроскопичность мембранны. В целях уменьшения поглощения влаги мембраной при разговоре и пении на рупор прибора набрасывают легкую ткань.

## 70. Анализ звуковых колебаний на электронном осциллографе

Микрофон, связанный с усилителем низкой частоты, присоединяется к вертикально отклоняющим пластинам электронного осциллографа (см. рис. 101, стр. 163). Когда на флюоресцирующем экране появится светлое пятно, включают генератор горизонтальной развертки электронного осциллографа примерно на частоте 20—40 гц. Далее перед микрофоном на расстоянии  $\approx 0,5$  м располагают различные источники звука, анализ которых желают произвести в аудитории.

Опыт следует начать с камертонов различных тонов и показать, что на одном и том же горизонтальном отрезке экрана укладывается различное число периодов синусоиды. Чем больше частота звучащего камертона, тем больше периодов синусоиды будем наблюдать на экране (при постоянной частоте горизонтальной развертки). Если взять камертон большой частоты ( $v = 2000$  гц), то на том же горизонтальном участке экрана уложится так много периодов, что их трудно сосчитать и различить в отдельности. Зритель увидит в этом случае на экране светлый прямоугольник, «заштрихованный» этими синусоидами. Высота этого прямоугольника пропорциональна величине амплитуды электродвижущей силы, подаваемой после усиления на вертикально отклоняющие пластины осциллографа.

Далее следует перед микрофоном расположить другие источники звука (органная труба, натянутая струна и т. д.) и проанализировать описанным способом их спектральный состав. Все варианты, рекомендованные в опыте «Демонстрационный прибор для анализа звуковых колебаний, сконструированный П. Н. Лебедевым», можно повторить с помощью микрофона и осциллографа. Следует на лекции отметить некоторые преимущества

электронного осциллографа по сравнению с другими методами анализа колебаний.

Если электронный осциллограф имеет вертикальный усилитель с достаточно большим коэффициентом усиления, а микрофон обладает значительной чувствительностью, то изображенный на рис. 101 усилитель низкой частоты можно исключить из установки. Для получения неподвижной картины на экране осциллографа приходится подгонять частоту развертки к частоте анализируемых звуков (см. демонстрацию «Высота звука»).

### ХІІІ. ОПЫТЫ ПО РЕЗОНАНСУ, ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН И НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ

#### 71. Наблюдение резонанса на камертонах

Закрепленные на резонаторных ящиках два камертона одинаковой частоты располагаются на демонстрационном столе на расстоянии 60—80 см один от другого (рис. 107).

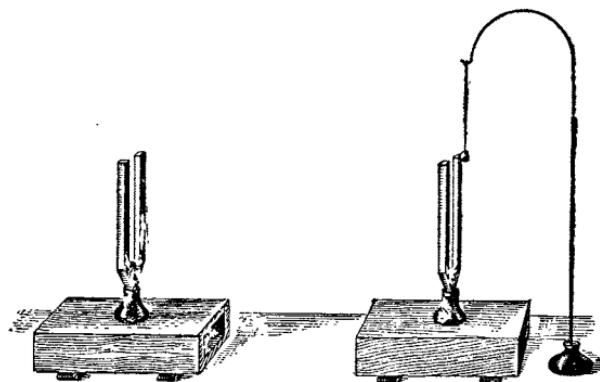


Рис. 107.

Отверстия резонаторных ящиков следует обратить друг к другу. Ветвь одного из камертонов касается подвешенного на нити небольшого шарика, выточенного из кости. Ударом деревянного молоточка или лучше с помощью

смычка возбуждается второй камертон. Если частоты камертонов равны или достаточно близки друг к другу, то первый камертон дошедшиими до его ящика волнами будет почти сейчас же возбужден. О его возбуждении можно судить или по беспорядочным движениям костяного шарика или непосредственно по звучанию первого камертона. В последнем случае необходимо прекратить звук камертона-генератора, коснувшись его ветвей рукой.

Опыт следует повторить, изменяя немного частоту одного из камертонов. Для этого необходимо на одной из ветвей камертона укрепить небольшую металлическую насадку. В этом случае явление резонанса не будет наблюдаться и костяной шарик перестанет отскакивать.

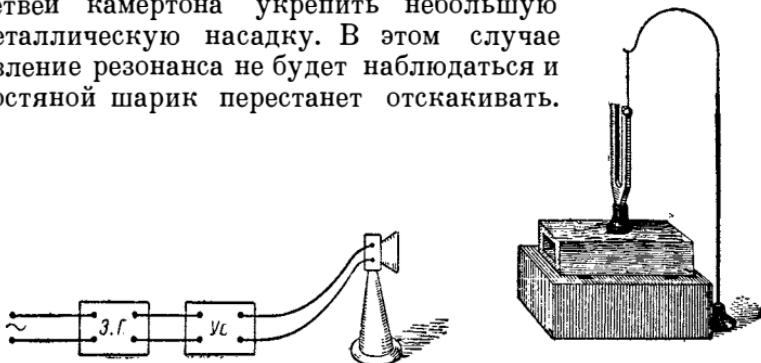


Рис. 108.

Этот опыт можно повторить с камертонами разных частот. Демонстрация допускает некоторые вариации. Можно убрать камертон-генератор, а вместо него расположить органную трубу, открытый конец которой обращен к входному отверстию резонаторного ящика камертона. Если тон звука, издаваемого органной трубой, близок к собственной частоте камертона, то последний возбудится. Аудитория в этом убеждается одним из указанных выше способов.

Можно поставить опыт еще и так. Звуковой генератор, соединенный с ламповым усилителем низкой частоты, возбуждает репродуктор. Камертон на резонаторном ящике располагается на расстоянии 50—60 см от репродуктора (рис. 108). Плавным изменением частоты звукового генератора можно возбудить камертон. Опыт следует показать,

проходя положение резонанса как со стороны более высоких частот, чем собственная частота камертонов, так и со стороны частот более низких.

Следует еще таким образом изменить опыт: подобрав частоту звучания репродуктора в резонансе с частотой камертонов и получив интенсивное отскакивание конского шарика, надеваем на одну из ветвей камертонов металлическую насадку. Явление резонанса исчезает. Плавным уменьшением частоты звучания репродуктора вновь подходим к резонансу. Пользуясь шкалой частот звукового генератора, оцениваем изменение собственной частоты камертонов, вызванное увеличением массы камертонов. Затем та же насадка располагается в другом месте камертонов, например ближе к его стеблю, и опыт повторяется снова.

Явление резонанса можно показать также на струнах, настроенных на одну частоту.

## 72. Интерференция звуковых волн \*)

Две одинаковые телефонные трубки закрепляются на деревянной или металлической планке (дощечке) на расстоянии 90—100 см друг от друга. Планка располагается в отдалении от каких-либо предметов, экранирующих звук. Планку с трубками следует закрепить в двух больших штативах на высоте 2—3 м над уровнем демонстрационного стола или лучше установить на балконе, сооруженном на передней стене лекционного зала, как это имеет место в большой физической аудитории МГУ. В этом случае слушатели будут находиться примерно в одинаковых условиях, т. е. относительно на равных расстояниях от телефонных трубок. Трубки обращаются своими отверстиями к рядам слушателей. Затем телефонные трубки возбуждаются переменным током (частоты примерно 3000 гц) от звукового генератора; звучание трубок должно быть однотонным. Далее предлагается слушателям, сидящим в аудитории, закрыть одно ухо рукой и, медленно наклоняясь то вправо, то влево,

\*) Опыт предложен и поставлен доцентом физического факультета И. А. Яковлевым.

ливать места большей и меньшей слышимости звука. При тишине, которая должна царить в аудитории при демонстрации описываемого опыта, это сделать не трудно.

Полезно подключить телефонные трубки к звуковому генератору в виде двух параллельных цепей и поставить в цепь каждой трубки по выключателю. В этом случае можно осуществить такой контрольный опыт. Одна из трубок выключается и в аудитории раздается звучание лишь одной трубки. Вновь присутствующим предлагается медленным покачиванием головы из стороны в сторону найти места максимального и минимального звучания. Когда зрители убеждаются в отсутствии в этом случае интерференционных зон, вновь включают обе трубки и повторяют опыт.

В этом эксперименте не следует сильно возбуждать телефонные трубки: при сильном звучании труднее различить зоны гашения и усиления звука.

Если напряжения, получаемые от звукового генератора, невелики, то необходимо поставить между генератором и телефонными трубками небольшой усилитель низкой частоты.

### 73. Биения

Рассмотрение явления биений колебаний можно начать с демонстрации одновременных колебаний двух простых, не связанных между собой маятников, немного отличающихся друг от друга по периоду. Полезно обратить внимание аудитории на те моменты времени, когда маятники совпадают по фазе или, наоборот, обладают максимальной разностью фаз. Движение маятников можно проектировать на экран (теневая проекция).

График сложения двух параллельных колебаний, близких по частоте друг к другу, демонстрируется с помощью двух электрокамертонов, как это описано в демонстрации «Сложение двух колебаний, направленных по одной прямой, наблюдаемое с помощью двух электрокамертонов». Мы уже тогда упоминали, что при постановке этого опыта практически всегда возникают биения. Поэтому, когда необходимо показать на экране специ-

ально график биения амплитуды, то приходится только усилить уже имеющуюся расстройку камертонов прикреплением к ветви одного из них небольшой металлической насадки.

Биения колебаний камертонов должны быть довольно частыми: три-четыре в секунду. При получении развертки на экране необходимо вращающемуся зеркалу дать относительно небольшое число оборотов в минуту; на экране должно уложиться одно-два полных изменения амплитуды колебаний во времени.

Для демонстрации биения звуковых колебаний берем сначала два возможно близких по частоте камертонов, установленных на резонаторных ящиках; располагаем их на демонстрационном столе так, как это необходимо для опыта «Наблюдение резонанса на камертонах» и одновременно их возбуждаем. Если, далее, несколько понизить частоту одного из камертонов, прикрепив к его ветвям кусочек воска или натянув на одну из ветвей резиновое колечко, то при одновременном звучании возбужденных камертонов возникнут отчетливо слышимые в аудитории биения. Вследствие малого затухания камертоны дают вполне заметные биения даже при весьма малой разнице в числе их колебаний. Для лучшей слышимости биений рекомендуется затем повернуть отверстия резонаторных ящиков к слушателям. Можно повторить опыт на камертонах большей или меньшей частоты по сравнению с первой парой камертонов.

Две одинаковые органовые трубы, настроенные в унисон, могут дать биения, если одну из них слегка расположить.

Расстройку трубы можно осуществить плавным передвижением боковой заслонки. Если такой заслонки в трубе нет, то операцию расстройки труб можно произвести, приближая палец к нижнему отверстию (щели) (рис. 109) или руку к верхнему широкому отверстию трубы (рис. 110). Рекомендуется установить трубы возможно дальше друг от друга на акустическом столе, чтобы избежать их взаимного влияния.

В ряде описанных акустических опытов появление биений служило нам доказательством того, что в одной

из труб изменились условия распространения звука (см. демонстрации «Возрастание скорости распространения звука в воздухе при повышении температуры» и «Скорость звука в различных газах»).

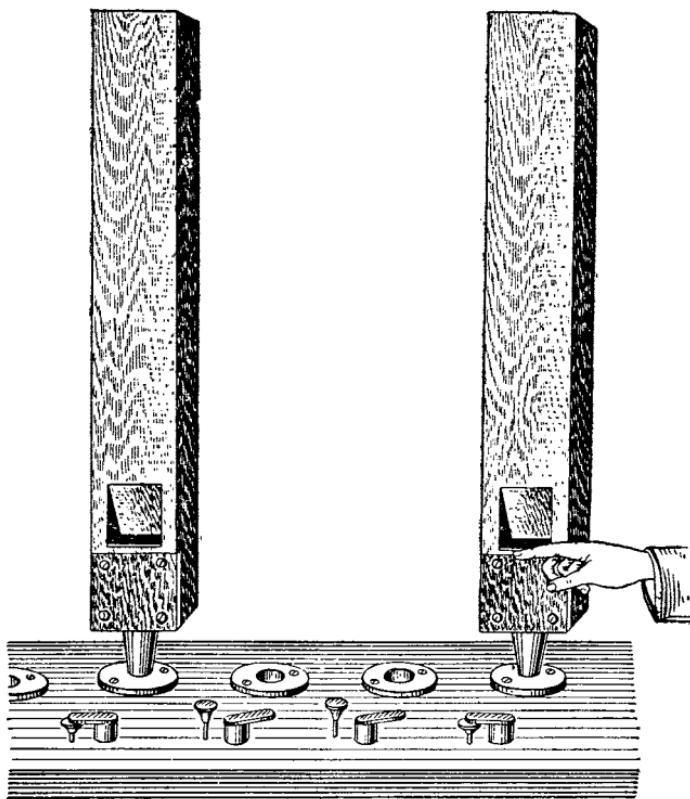


Рис. 109.

Опыт возникновения акустических биений можно показать еще на двух струнах. Желательно натянуть их на разных монохордах: если струны натянуты на одном монохорде, то при малой разнице в частотах звуков, издаваемых струнами, биения могут не возникнуть вследствие явления захватывания (см. ниже демонстрацию «Акустическое захватывание»).

Весьма убедительна демонстрация акустических биений на двух репродукторах, возбуждаемых двумя звукошими генераторами. Для постановки такого опыта можно

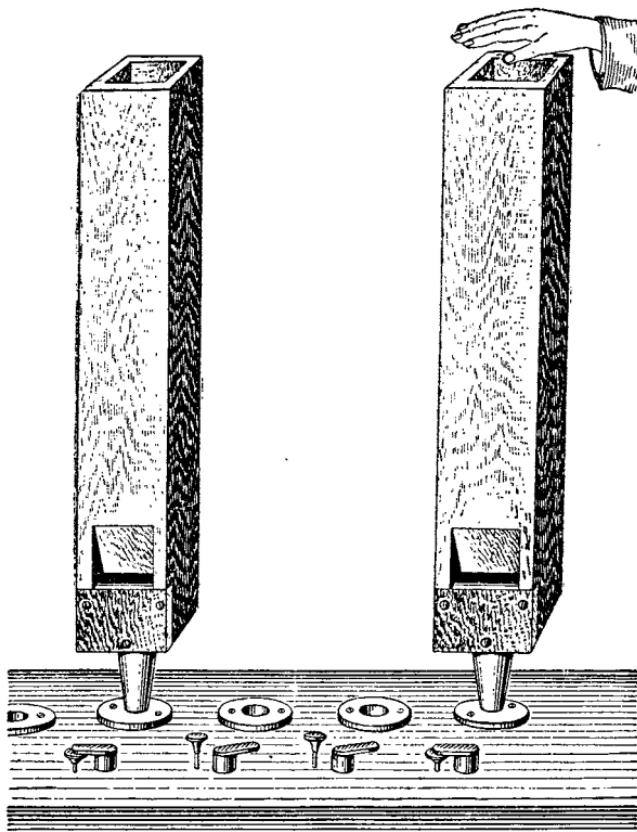


Рис. 110.

воспользоваться схемой, изображенной на рис. 52, исключив из нее электронный осциллограф.

Опыт следует начать с однотонного звучания двух репродукторов примерно на частоте 1000  $гц$ . При медленном изменении (уменьшении или увеличении на несколько герц) частоты одного из генераторов в звучании репродукторов отчетливо послышится периодическое изменение силы звука.

Продолжая изменять частоту одного из генераторов, демонстратор задерживает внимание аудитории на получении акустических биений разной частоты. Наконец, следует настолько расстроить частоты генераторов, что человеческое ухо перестанет улавливать биение амплитуды.

Когда частота биений достигнет около 30 в секунду, то непосредственно уловить периодическое изменение амплитуды невозможно, однако наличие его можно обнаружить по диссонансу издаваемых звуков. Затем необходимо провести опыт в обратном порядке, проходя вновь через биения различной частоты. Опыт заканчивается звучанием репродукторов в унисон.

Полезно весь эксперимент повторить снова, начав его с однотонного звучания репродукторов не на 1000  $\text{гц}$ , как это мы предлагали сделать выше, а на 500 или 1500  $\text{гц}$ .

#### 74. Акустическое захватывание

Захватывание, или принудительная синхронизация частоты между внешней периодической силой и колебательной системой, на которую внешняя сила действует, можно демонстрировать в аудитории таким образом. На акустическом столе устанавливается органная труба; вторая органная труба той же частоты, что и первая, но соединенная с отверстием органного столика с помощью толстого резинового шланга, располагается на расстоянии 1—1,5  $\text{м}$  от первой. Эту трубу демонстратору следует держать во время опыта в руке.

Пустив в ход воздуховку, подающую воздух в органный столик, настраивают звучащие органные трубы так, чтобы между ними возникли биения, отчетливо слышимые в аудитории. Если теперь начать медленно приближать вторую трубку к первой, то частота биений начнет уменьшаться, а при расстоянии 4—6  $\text{см}$  между трубами биения исчезнут вовсе, трубы будут звучать в унисон.

При удалении второй трубы явление повторится в обратном порядке.

Следует обратить внимание на то, что явление захватывания может протекать по-разному: 1) если мощности органных труб одинаковы, то общий тон звучания труб

равен среднему тону по отношению к частотам звучащих тел; 2) если мощности труб разные, то в результате захватывания устанавливается частота более мощного источника звука.

### 75. Явление Допплера

**Опыт с движением звучащего камертоном.** Для показа этого опыта надо быстро передвигать возбужденный камертон перпендикулярно к рядам слушателей, сидящих в аудитории. Это приближение и удаление камертоном удобно

производить вблизи классной доски, укрепленной на передней стене аудитории: при этих движениях возникают биения вследствие интерференции звуковых волн, излучаемых движущимся камертоном, и волн, отраженных от стены. Если прекратить передвижение камертона, биения исчезают.

Камертон следует так держать в руке, чтобы при этих манипуляциях звуковое излучение было максимальным в направлении сидящих слушателей. Для постановки этого опыта необходимо взять камертон, издающий возможно более высокий тон, порядка 2000 гц (рис. 111). Так как камертоны такого диапазона частот не снабжаются резонаторным ящиком (ящик был бы слишком мал), то для

демонстрации этого опыта необходимо камертон сильно возбудить. Укрепив камертон в каком-либо держателе, проводят сбоку по обеим его ветвям хорошо наканифоленным виолончельным или басовым смычком, а далее демонстрируют рассмотренный выше опыт.

**Опыт с колебаниями звучащего репродуктора.** Легкий репродуктор подвешивается на двух нитях к высокому штативу. Репродуктор присоединяется к ламповому зву-

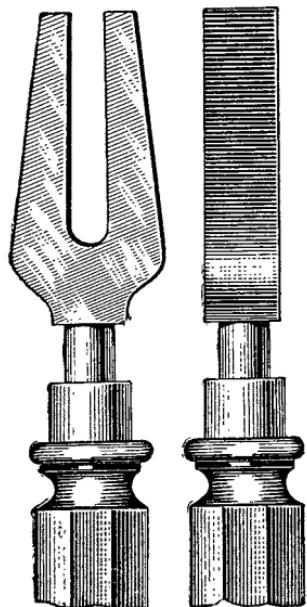


Рис. 111.

ковому генератору. Желательно для усиления звучания репродуктора между ним и звуковым генератором включить ламповый усилитель (например У-50). Вызвав звучание репродуктора на определенной частоте, демонстратор отклоняет репродуктор на небольшой угол. При колебаниях репродуктора аудитория уловит периодическое изменение частоты звука. Репродуктор должен колебаться в плоскости, перпендикулярной к рядам слушателей: в этом случае репродуктор будет то приближаться, то удаляться от слушателей. Обязательно следует до раскачивания звучащего репродуктора и после этого дать аудитории возможность (для сравнения) прислушаться в течение 10—15 сек. к звучанию покоящегося репродуктора.

Если репродуктор не тяжел, то этот опыт можно осуществить еще проще: взяв в руку репродуктор, демонстратор быстро им машет или просто вращает его.

Для этого варианта опыта необходимо к репродуктору прикрепить какой-либо держатель. В небольшой аудитории можно воспользоваться просто телефонной трубкой.

Во всех случаях подводка тока от генератора к репродуктору должна производиться с помощью длинных, гибких и изолированных проводников, которые не мешали бы движению или вращению репродуктора или телефонной трубки.

**Опыт с вращением органной трубы.** Прибор состоит (рис. 112) из органной трубы  $T$ , укрепленной на одном из концов деревянной довольно длинной планки  $П$ . Планка в средней своей части укреплена на оси так, чтобы весь прибор мог быть приведен во вращение. Конструкция прибора дает возможность подавать воздух к органной трубе от какой-либо воздуходувки при вращении прибора (см. ниже).

Опыт следует начинать с продувания воздуха через органную трубу, не приводя прибор во вращение. После 15—20 сек. звучания трубы вся система приводится во вращение с частотой 1—3 оборота в секунду. В этом случае частота звука, воспринимаемого слушателями, изменится: при движении трубы в сторону слушателя высота

звука повышается, при движении трубы от слушателя — понижается.

*Некоторые конструктивные данные прибора.* 1) Примерные размеры деревянной планки:  $2\text{ см} \times 5\text{ см} \times 200\text{ см}$ .

2) Для этого опыта берется наиболее короткая органная труба, длиной примерно  $10\text{--}12\text{ см}$ .

3) Планка  $P$  прикрепляется винтами к верхнему основанию небольшого полого металлического цилиндра  $A$ , который нижней своей частью опирается на кольцевой шарикоподшипник, вделанный в массивном штативе.

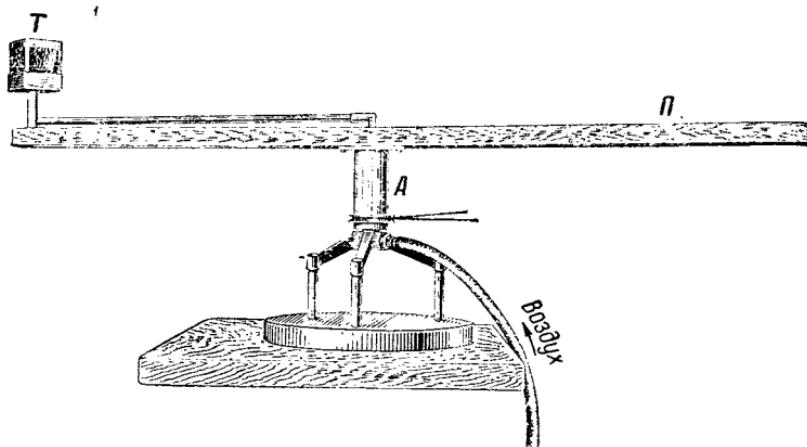


Рис. 112.

4) Металлическая изогнутая трубка  $ab$ , проходящая через отверстие в шарикоподшипнике (рис. 112а), соединяет внутреннюю полость цилиндра  $A$  с резиновым шлангом воздуховки. Металлическая трубка  $вг$  соединяет внутреннюю полость цилиндра  $A$  с кондом органной трубы. Подобное устройство дает возможность подавать воздух к органной трубе при вращении прибора.

5) Для приведения прибора во вращение на поверхности цилиндра укреплен шкив, который соединяется ременной передачей с мотором постоянного тока.

Прибор конструктивно можно оформить иначе, укрепив мотор, вращающий планку непосредственно в опорном штативе.

Вместо органной трубы на конце планки можно укрепить телефонную трубку. В этом случае необходимо изменить конструкцию прибора и вместо цилиндра *А* предусмотреть кольца и щетки для подачи переменного тока от звукового генератора к вращающейся трубке.

Можно укрепить на планке не одну телефонную трубку, а две, на обоих концах; при этом желательно так сконструировать прибор, чтобы можно было включать ток в каждую

телефонную трубку порознь. Опыт выигрывает, если включение и выключение тока в цепи каждой трубки можно производить при вращении прибора. Полезно иметь для сравнения получаемых звуков третью трубку, лежащую тут же на демонстрационном столе и питаемую от одного и того же звукового генератора. Если звуковой генератор, питающий трубы, недостаточно мощный, то следует его напряжение предварительно усилить небольшим усилителем низкой частоты.

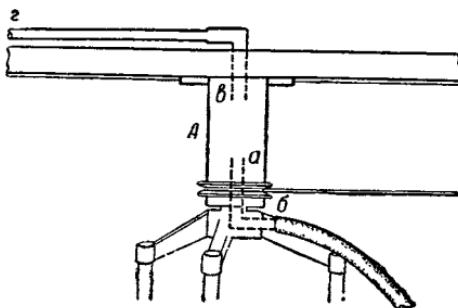


Рис. 112а.

## 76. Модуляция звуковой волны

Периодическое изменение амплитуды звуковой волны приводит к нарушению ее монохроматичности\*). Если тем или иным способом изменять с частотой  $\gamma$  амплитуду звуковой волны, то в общем случае в ней наряду с основной частотой  $\nu_0$  можно обнаружить колебания с частотой  $\nu_0 + \gamma$  и  $\nu_0 - \gamma$ . Следовательно, волну с периодически меняющейся амплитудой можно рассматривать как совокупность трех монохроматических волн.

Для демонстрирования этого явления поступаем следующим образом. Два камертона одинаковой частоты,

\*) См. Г. С. Ландсберг, Оптика, Гостехиздат, 1947 г.

обращенные друг к другу отверстиями своих резонаторных ящиков, располагаем на подъемных столиках (рис. 113). Костяной шарик, подвешенный на нити, касается ветви одного из камертонов. В начале опыта проверяем наличие резонанса между камертонами, затем на ветвь камертон-генератора укрепляем небольшую металлическую насадку, уменьшающую частоту его колебаний примерно на 3—4 колебания в секунду. Теперь явление

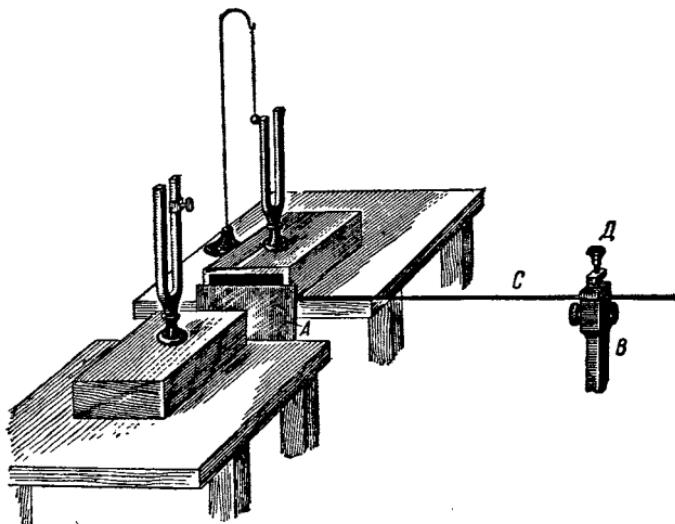


Рис. 113.

резонанса между камертонами исчезает, в чем аудитория убеждается непосредственно на опыте. Далее располагаем между резонаторными ящиками картонную пластинку (заслонку) *A*, укрепленную на длинной тонкой стальной полосе *C*. При отклонении пластинки *A* вверх она начнет колебаться, периодически заслоняя волну, излучаемую камертоном. Теперь в волне, излучаемой камертоном-генератором, появится наряду со звуковой волной частоты  $\nu_0$  волна с несколько большей, чем  $\nu_0$ , частотой и волна с частотой, несколько меньшей. Если так подобрать металлическую насадку на камертоне, чтобы уменьшение его частоты колебания равнялось частоте колебания за-

заслонки, то явление резонанса вновь возникнет между камертонами при наличии насадки на камертоне-генераторе.

Для наблюдения этого явления в большой аудитории необходимо сильно возбудить камертон, утяжеленный насадкой, и сейчас же привести в колебательное движение заслонку *А*. Костяной шарик обнаружит колебание камертона-приемника.

Основная трудность описываемой демонстрации заключается в том, что необходимо подобрать такую насадку и закрепить ее на камертоне в таком месте, чтобы вызвать расстройку камертонов на величину, равную частоте колебания заслонки. Эту операцию можно облегчить, измеряя предварительно по биениям камертонов степень их расстройки и определяя затем число колебаний заслонки в секунду. В этом случае можно грубо подобрать необходимую частоту колебаний заслонки *А*. Затем следует приступить к более точной подгонке положения насадки на ветви камертона-генератора. При каждом новом передвижении насадки необходимо проверять, появился ли резонанс между камертонами при колебаниях заслонки.

Для этого опыта надо сильно возбуждать камертон. С этой целью медленно проводят хорошо натертым канифолью смычком сбоку по обеим ветвям камертона. Камертон возбуждают, не снимая его с подъемного столика. Для осуществления более интенсивной связи и для более резкого изменения амплитуды распространяющейся волны камертоны располагают возможно ближе друг к другу (3—4 см).

*Некоторые данные об установке.* 1) Этот опыт в физическом кабинете МГУ ставится с камертонами, которые дают 384 колебания в секунду.

2) Размеры картонной заслонки: 12 см × 12 см.

3) Размеры стальной полосы *С*: длина 70 см, сечение 6 мм × 12 мм. Длину полосы можно изменять, зажимая ее конец в разных местах винтом *Д* в массивном штативе *В* (рис. 113).

4) Заслонку на металлической полосе необходимо так закрепить в вертикальной стойке штатива, чтобы

плоскость заслонки закрывала в положении равновесия отверстия резонаторных ящиков наполовину. В этом случае изменение интенсивности излучаемой волны будет максимальным.

Этот опыт можно поставить иначе: вместо камертонагенератора вблизи ящика камертон-приемника располагается репродуктор (динамик), возбуждаемый звуковым генератором с плавным изменением частоты. Если звуковой генератор недостаточно мощный, то переменное напряжение, подаваемое на репродуктор, предварительно усиливается. В этой постановке опыта насадку, изменяющую частоту колебания, необходимо перенести на первый камертон-приемник. В остальном опыт демонстрируется так же, как и с двумя камертонами. Вариант опыта с репродуктором более прост в постановке.

## XIV. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В ТРУБАХ, СТЕРЖНЯХ, ПЛАСТИНАХ

### 77. Стоячая звуковая волна в трубе

Изготовленная из жести длинная открытая с одной стороны труба, располагается в нескольких сантиметрах от диффузора репродуктора, соединенного с ламповым звуковым генератором (рис. 114). Открытый конец трубы, обращенный к репродуктору, закрыт тонкой хорошо натянутой резиной или бумагой. На боковой поверхности трубы сделано несколько десятков маленьких, одинаковых по диаметру отверстий, расположенных по одной линии. С помощью боковой насадки труба присоединяется к газовой сети здания.

Опыт ведется в такой последовательности.

Труба наполняется светильным газом, который поджигается у всех отверстий трубы. Краном газовой сети размеры всех пламен доводятся до высоты 2—3 см. Затем включается звуковой генератор. Звуковые волны вызовут колебание мембранны трубы, что приведет к колебательному движению столба газа в трубе. Если частота генератора подобрана так, что вдоль трубы уложится нечетное

число четвертей звуковой волны, то в полости трубы установится стоячая волна. Теперь высоты газовых пламен перестанут быть одинаковыми: в тех местах полости трубы, где возникнут пучности стоячей волны, высоты пламен увеличиваются; в тех местах трубы, где устанавливаются узлы волны, пламена уменьшаются. Если в трубе сделано достаточно много отверстий для истечения газа, то подобный строй пламен хорошо передает картину распределения амплитуд давления в стоячей звуковой волне.

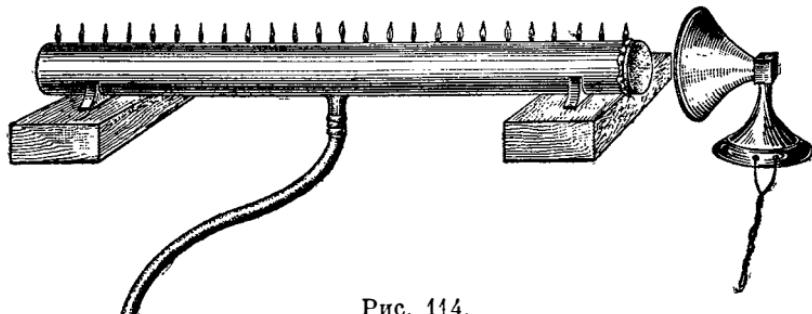


Рис. 114.

При изменении тона звукового генератора газовые пламена начнут колебаться, то увеличиваясь, то уменьшаясь в размерах, до тех пор пока изменяемая частота звука не совпадет вновь с нечетным числом четвертей волн, укладывающихся по длине трубы.

Этот вид резонансного возбуждения трубы следует показать на разных звуковых частотах.

*Практические указания.* 1) Примерные размеры трубы: длина 200 см; диаметр ее 12 см.

2) Для получения более четкой картины распределения амплитуд давления рекомендуется отверстия в трубе сверлить довольно часто, примерно на расстоянии 25—30 мм. Число их определяется длиной трубы. Все отверстия должны быть одинакового диаметра (примерно 1—1,5 мм), с ровными краями, без заусенцев. Не рекомендуется отверстия в трубе оформлять насадками, трубочками и пр., как это иногда делается. Подобные насадки увеличивают трение газа о стенки выходных отверстий и тем самым способствуют выравниванию давлений в

полости трубы. В этом случае характер распределения давлений, отражаемый пламенами, будет проявляться нечетко.

3) Можно к светильному газу добавить немного паров бензола. В этом случае пламена приобретают белую окраску. Это смешивание производится таким образом: светильный газ пропускается через небольшой сосуд (емкостью 1—1,5 л), на дне которого лежит вата, смоченная бензолом (рис. 115).



Рис. 115.

4) Если звуковой генератор, возбуждающий репродуктор, обладает недостаточной мощностью, то между звуковым генератором и репродуктором включается усилитель звуковой частоты.

5) После окончания опыта трубу с газом немедленно выносят из аудитории и в препараторской продувают ее в вытяжном шкафу.

Опыт наблюдения в трубе стоячей звуковой волны можно осуществить несколько иначе. Труба для второго варианта опыта берется тех же размеров, как и в предыдущем случае, но с закрытыми с обеих сторон основаниями. С одного конца через центр основания трубы пропускается металлический стержень, на конце которого укрепляется телефонная трубка, возбуждаемая звуковым генератором. С другого конца трубы, также внутри нее, располагается микрофон, выводы от которого присоединяются к вертикально отклоняющим пластинам электронного осциллографа. При возбуждении телефона в трубе возникает стоячая звуковая волна, давление которой на мембранию микрофона вызовет переменную электродвижущую силу. При передвижении микрофона или телефона вдоль трубы \*) электродвижущая сила, снимае-

\*) В описываемом нами экземпляре прибора только телефонная трубка сделана передвигаемой.

мая с микрофона, будет изменяться, что скажется на изменении амплитуды колебаний электронного пучка по экрану электронного осциллографа. Когда микрофон попадает в пучность давления звуковой волны, амплитуда колебаний электронного пучка будет максимальной.

Для увеличения наблюдаемого отклонения следует использовать ламповый усилитель, имеющийся в электронном осциллографе. При плавном передвижении телефона вдоль трубы можно обнаружить узлы и пучности давления, устанавливающиеся в трубе при этих передвижениях. Измеряя расстояние между узлами и пучностями или между соседними пучностями, определяют скорости распространения звука в газе.

Если на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подать напряжение от генератора развертки, то на экране будет получена синусоида, амплитуда которой зависит от расстояния между микрофоном и телефоном.

Обязательно следует провести опыт изменения частоты переменного тока, возбуждающего телефон, и проанализировать полученные варианты опыта.

Для демонстрации этого ряда опытов необходимо несколько видоизменить устройство трубы. Вместо одного отверстия для подачи газа труба снабжается двумя, через одно отверстие газ втекает в трубу, через другое уходит. Эти отверстия располагаются по обоим концам трубы. Мелкие отверстия в этом случае не нужны. С помощью такой установки можно демонстрировать получение стоячих волн в трубе, заполненной воздухом, светильным газом, углекислотой и пр.

## 78. Влияние затухания системы на остроту настройки (резонансная дека)

Смычком или легким молоточком камертон возбуждается и демонстрируется продолжительность его звучания. Затем для сравнения возбуждается зажатая в тиски пружина, деревянная пластина и т. п. Обращается внимание аудитории на то, что системы, не имеющие резко выраженной собственной частоты колебаний (например

доска), в противоположность системам с резко выраженной собственной частотой (камертон), быстро затухают.

Затем высказывается другое положение, а именно, что системы с большим затуханием способны реагировать на воздействие внешнего возбуждения в значительном диапазоне частот. В качестве иллюстраций к сказанному показывается такой опыт.



Рис. 116.

Звучащий камертон ставится своим стеблем на небольшую деревянную досочку, лежащую на двух подставках. Досочка отчетливо резонирует на колебания камертонов. Таким же образом демонстрируется усиление звучания второго и третьего камертонов, собственные частоты которых различны. Наконец, возбуждают два или более камертонов различного тона и одновременно опускают их стеблями на одну деревянную доску, играющую роль деки. Досочка усилит звучание всех камертонов. Желательно подобрать такие камертоны, которые давали бы приятное звучание.

В качестве такой демонстрационной деки желательно взять досочку, изготовленную из сухой ели, без сучков и изъянов. Ее примерные размеры  $10\text{ см} \times 40\text{ см} \times 40\text{ см}$ .

Последний вариант опыта можно показать иначе.

Патефонная пластинка с записью музыки укрепляется на оси центробежной машины и приводится в медленное и равномерное вращение \*), затем на врачающуюся пластинку опускается небольшая фанерная досочка, к углу которой прикреплена иголка (рис. 116). Досочка будет

\*) Можно использовать для этой цели механизм патефона.

колебаться, воспроизводя звуки разных частот. Возможно уловить даже мотив записанной на пластинке музыки.

Примерные размеры досочки  $3\text{ mm} \times 25\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ .

Когда демонстратор опускает досочку на вращающуюся пластинку, то удобно для устойчивости опираться локтем о поверхность демонстрационного стола.

### 79. Поперечные колебания стержней

Взяв в руку конец довольно длинной деревянной или металлической линейки, приводят ее в колебательное движение (рис. 117). Если линейка достаточно тонка, то

на ней устанавливается стоячая поперечная волна с узлом в закрепленном конце и пучностью — на свободном. При относительно медленных колебаниях руки на линейке устанавливается лишь  $\frac{1}{4}$  волны, при более быстрых —  $\frac{3}{4}$  волны. Большее число четвертей волны установить на линейке, приводя ее в движение рукой, довольно трудно.



Рис. 117.

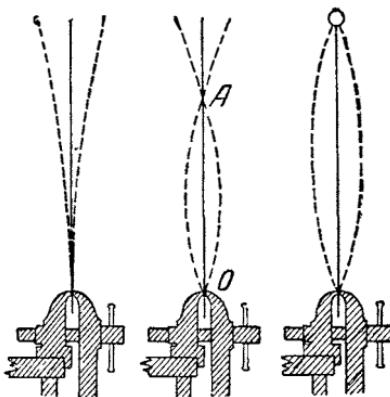


Рис. 118.

Полезно проделать такой опыт. Взяв в руку деревянную линейку за ее середину, ударяем рукой по одному из концов; при этом можно наблюдать соответственные

колебания второго конца. Если захватить линейку на расстоянии  $\frac{1}{4}$  ее длины от конца, то при ударе по короткому концу можно наблюдать образование на противоположном конце линейки  $\frac{3}{4}$  длины стоячей волны.

Этот опыт можно проделать еще иначе: сажаем металлическую пружину в тисках, а затем ударом легкого молоточка или просто щелчком приводим ее в колебательное движение (см. демонстрацию «Колебания зажатой в тиски пружины»). Удар по пружине следует нанести

между точками  $A$  и  $O$  (рис. 118). Для получения четкой картины рекомендуется при возбуждении пружины касаться пальцем или палочкой точки  $A$ , где устанавливается узел. Демонстрировать эти опыты следует в теневой проекции.

Пружину можно заставить совершать два колебательных движения одновременно, дав ей толчок в тот момент, когда она занимает одно из крайних положений. О появлении двух поперечных колебаний пружины аудитория может судить по размытости тени отдельных частей пружины.

Этот опыт можно повторить с пружиной, нагруженной деревянным шариком (см. демонстрацию «Колебания зажатой в тиски пружины»). В этом случае помимо колебания всей пружины вместе с шариком можно наблюдать второе колебание пружины с узлами на обоих концах.

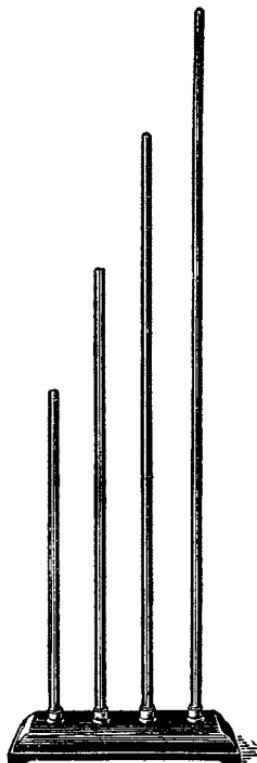


Рис. 119.

## 80. Продольные колебания стержней

Деревянные тонкие стержни различной длины укрепляются в чугунной подставке (рис. 119). Если провести вдоль каждого стержня сверху вниз пальцами, обсыпанными порошком канифоли, то стержни придут в довольно интенсивные

продольные колебания и будут издавать звук. Высота звуков, издаваемых стержнями, обратно пропорциональна их длинам. Длины стержней следует так подобрать, чтобы составился мажорный аккорд.

Примерные размеры стержней: 75, 60, 50 и 37,5 см; диаметр стержня 9—12 мм. Стержни изготавливаются из сухой еловой доски. Доску следует взять без сучков, с ровной линией слоев. Поверхности стержней следует после рубанка обработать стеклянной бумагой мелких номеров.

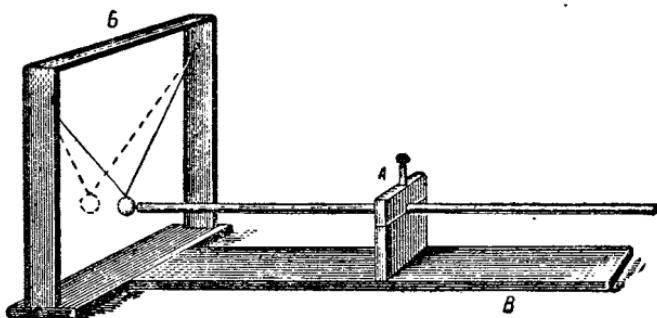


Рис. 120.

Этот же опыт можно осуществить на стеклянных трубках разной длины. Удобно этот опыт проделать таким образом: экспериментатор держит левой рукой тонкую стеклянную трубку (диаметр трубы примерно 10—12 мм), ухватив ее за середину, а мокрой суконкой, которую держит в правой руке, проводит от середины к концу трубы.

Желательно повторить опыт с трубкой, длина которой в два раза меньше первой, и получить звук на октаву выше.

В физических кабинетах можно встретить прибор, с помощью которого особенно наглядно демонстрируются продольные колебания, возникающие в металлических стержнях. Стальной стержень диаметром  $\approx 8$  мм и длиной  $\approx 500$  мм жестко закрепляется в середине массивной чугунной подставки А (рис. 120). У левого его конца подвешивается на бифилярном подвесе шарик, выточенный

из кости (диаметр шарика 8—10 м.м.). Шарик должен касаться конца стержня. Если слегка тереть куском на-канифоленной кожи правую половину стержня, вблизи его конца, то стержень начнет издавать довольно чистый звук. Это звучание вызывается продольными колебаниями стержня. О направлении этих колебаний аудитория судит по движениям костяного шарика, отскакивающего от левого конца стержня. При сильном возбуждении стержня шарик отскакивает на 15—20 см от его конца.

В целях большей устойчивости прибора, что существенно для рассматриваемого опыта, подставка *A* и соединительная рейка *B* должны быть по возможности **массивными**.

### 81. Возбуждение продольных колебаний стержня с помощью бесконечного смычка \*)

Стальной стержень длиной  $\approx 50$  см и диаметром  $\approx 8$  м.м укрепляется на конусах в своей средней части в небольшой металлической скобе (рис. 121). Небольшая втулка, охватывающая среднюю часть стержня, прочно соеди-

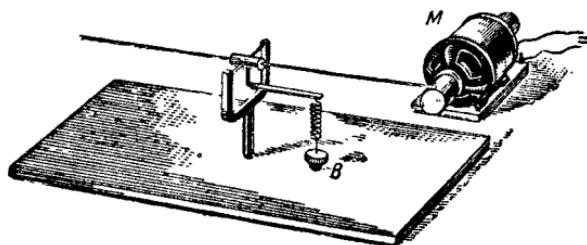


Рис. 121.

нена с металлическим изогнутым рычагом, конец которого оттягивается довольно упругой пружиной. У одного из

\*) Этот прием получения сильного звука применялся В. Я. Альбергом в лаборатории П. Н. Лебедева при исследовании давления, производимого звуковой волной.

концов стержня располагается мотор постоянного тока, частоту вращения которого можно регулировать реостатом. На оси мотора укреплен небольшой бакелитовый шкив, по образующей которого проточен желобок. Мотор расположен по отношению стержня так, что шкив при своем вращении трется по поверхности конца стержня. Пружина, оттягивающая стержень, обеспечивает постоянное и довольно сильное давление конца стержня на поверхность желоба шкива. При вращении мотора стальной стержень начнет издавать весьма интенсивный звук. Для усиления звучания на свободный конец стержня можно укрепить короткий рупор, сделанный из бумаги или из тонкого листа алюминия.

Бакелит при изготовлении шкива можно заменить текстолитом. В этом случае для увеличения трения рекомендуется на поверхность желоба посыпать немного хорошо растертой канифоли. Диаметр шкива 25—30 м.м. Прибор монтируется на деревянной панели. Для уменьшения вибрации панели при вращении мотора рекомендуется последний укрепить на отдельной подставке. Кроме того, в целях уменьшения гудения мотор следует закрыть звуконепроницаемым кожухом.

Степень натяжения пружины регулируется винтовым приспособлением *B*.

## 82. Звучащие пластинки

Изготавляется набор деревянных плоских пластинок одинаковой длины и ширины, но отличающихся друг от друга толщиной. При падении таких пластинок с высоты примерно одного метра на пол или на поверхность демонстрационного стола возникает шум, в котором легко можно уловить звуки определенной частоты. Так, например, при падении тонкой пластинки чувствуется звук на октаву выше звука, возникающего при падении пластинки в два раза более толстой.

Если изготовить восемь пластинок, толщины которых относятся друг к другу, как частоты в мажорной гамме, то, бросая такие пластинки на демонстрационный

стол в последовательности убывания или, наоборот, возрастания толщины (рис. 122), можно вызвать ряд звуков, напоминающий гамму.

Примерные размеры пластиночек: длина 210 *мм*, ширина 30 *мм*. Толщина самой тяжелой пластиночки 8 *мм*, самой легкой 4 *мм*. Материал — сухая ель.

Можно поступить иначе: на двух веревках нанизать набор деревянных пластиночек различной длины (рис. 123). При ударе деревянного молоточка по длинной пластиночке возникает низкий тон, при ударе по короткой — относи-

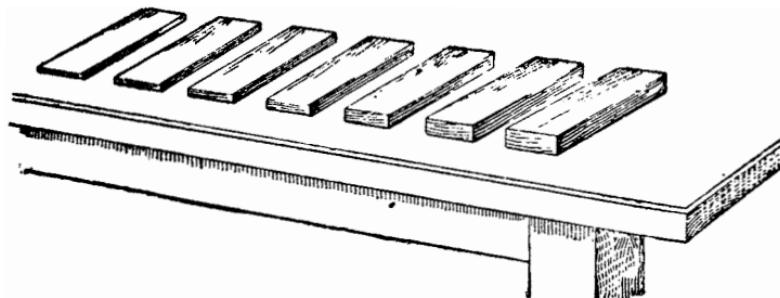
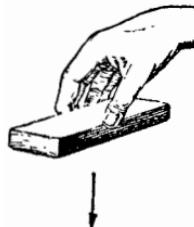


Рис. 422.

тельно высокий тон. Ударяя молоточком по различным пластиночкам, можно исполнить несложную музыкальную мелодию. На этом принципе устроен ударный музыкальный инструмент — ксилофон.

Примерные данные демонстрационного ксилофона: число деревянных стержней 18; длина самого длинного стержня 42 *см*, самого короткого 17 *см*; сечение всех стержней  $\approx 20 \text{ мм} \times 22 \text{ мм}$ . С ударяемой стороны края всех стерж-

ней (вдоль их длин) немного закруглены. Веревки проходят через стержни в тех точках, где устанавливаются в стержнях узлы звуковой волны.

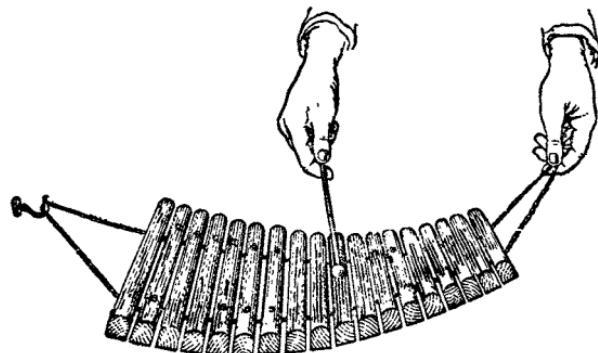


Рис. 123.

Иногда вместо деревянных стерженьков берут набор металлических пластинок разной длины. В этом случае прибор напоминает старинный музыкальный инструмент — цимбалы.

## XV. ПЬЕЗОАКУСТИКА

В электроакустике и измерительной технике в настоящее время широко распространены пьезоаппараты (пьезотелефоны, пьезомикрофоны, пьезоадAPTERы, пьезодатчики и т. д.). Все эти приборы основаны на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдавшегося в кристаллах сегнетовой соли \*). Для демонстрации прямого и обратного пьезоэффектов удобно пользоваться монокристаллами сегнетовой соли, пьезоэффект в которых достигает значительной величины.

Выращивание монокристаллов производится из насыщенного раствора сегнетовой соли в особых камерах при

\*) Сегнетовая соль — калиево-натриевая соль винной кислоты. Температура плавления соли около  $70^{\circ}\text{C}$ . При температуре  $54^{\circ}\text{C}$  сегнетовая соль теряет свои пьезоэлектрические свойства.

строго определенной температуре. В сосуд с раствором сегнетовой соли помещается небольшой кристалик («затравка»), на поверхность которой оседают из раствора молекулы сегнетовой соли. Вследствие этого «затравка» непрерывно увеличивается в объеме, сохраняя при этом определенную кристаллическую форму. Кристаллы сегнетовой соли имеют форму двенадцатигранной призмы. Операция выращивания большого монокристалла длится несколько дней. На рис. 124 изображен подобный монокристалл.

Высота его может достигать  $\approx 150$  мм; размеры кристалла в плоскости наибольшего сечения  $\approx 140$  мм. Вес такого монокристалла достигает нескольких килограммов. Пьезоэлектрические свойства монокристалла сегнетовой соли неодинаковы по разным кристаллографическим направлениям: наибольший пьезоэфект наблюдается в пластине кристалла, расположенной перпендикулярно к оси *аб* (рис. 124). При сжатии квадратной пластины, вырезанной указан-

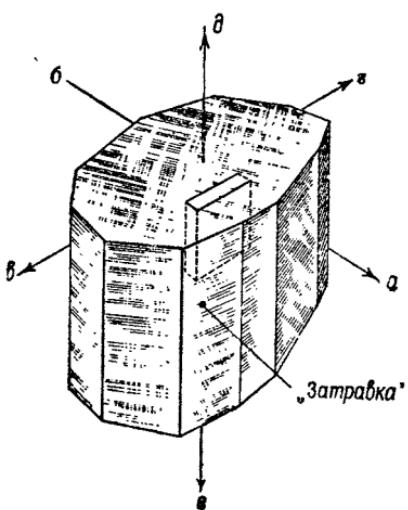


Рис. 124.

ным способом вдоль одной из ее диагоналей, на широких гранях пластины появляются заряды противоположных знаков, величина которых пропорциональна величине приложенной силы. При сжатии пластины вдоль другой диагонали электрическая полярность пластин изменяется на обратную.

На предприятиях, изготавливающих пьезоаппаратуру, большие монокристаллы разрезаются в строго определенных направлениях на пластины различных размеров в зависимости от назначения пьезоприбора. Операция деления большого монокристалла на небольшие пластины производится на специальных станках с помощью ряда

двигающихся ниток, которые при каждом своем обороте проходят ящик с водой: кристаллы сегнетовой соли весьма гигроскопичны, поэтому влажная нитка растворяет прилегающий к ней слой, углубляясь при движении в тело кристалла. Затем отдельные пластины кристалла шлифуются до нужного размера.

Для снятия зарядов, появившихся на поверхности кристалла при его деформации, обе поверхности кристалла покрываются тонкой фольгой, к которой прикрепляются или прижимаются контакты \*).

### 83. Прямой пьезоэффект

Для демонстрации в аудитории пьезоэффекта сегнетовой соли весьма удобен такой прибор.

Из монокристалла сегнетовой соли вырезается пластина в плоскости, перпендикулярной к оси *ab*. Этой пластине придается прямоугольная форма таким образом, чтобы направление максимального пьезоэффекта совпало с направлением одной из пар его граней. Подобный срез кристалла обычно называется 45-градусным *x*-срезом. Пластина кристалла 45-градусного *x*-среза помещается между двумя широкими пружинящими латунными контактами, причем грани, соответствующие максимальному пьезоэффекту, располагаются вертикально. Размеры контактов подобраны такими, чтобы верхний край кристалла *A* сегнетовой соли на несколько миллиметров поднимался над концами контактов *B* (рис. 125). Широкие поверхности кристалла с помощью контактов соединяются проводами с электродами небольшой неоновой лампы *C*. Если теперь ударить резиновым молоточком по верхней грани кристалла *A*, то его широкие поверхности настолько сильно наэлектризуются, что разность потенциалов между ними достаточна для слабого разряда между электродами неоновой лампы. При последующем ударе молоточком

\*) К поверхности кристалла фольга часто просто приклеивается. При такой операции общая электрическая емкость кристалла уменьшается примерно на 10%. Поэтому в промышленности существуют другие способы металлизации поверхности кристалла, которые не снижают электрических качеств кристалла.

по поверхности кристалла разряд неоновой лампы вновь повторится. Опыт рекомендуется провести несколько раз.

Весьма содержательна демонстрация прямого пьезоэффекта в следующем варианте. Неоновая лампа отключается от поверхностей кристалла, а пружинящие контакты, охватывающие кристалл, присоединяются непосредственно к вертикально отклоняющим пластинам электрон-

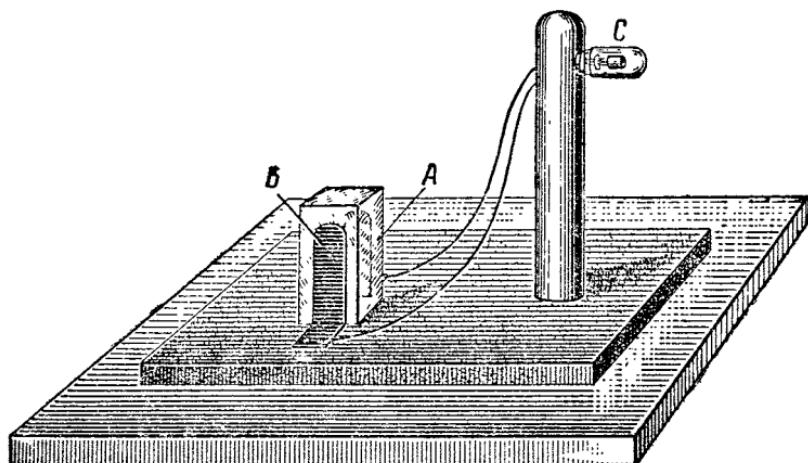


Рис. 125.

ногого осциллографа \*). При каждом ударе молоточка по поверхности кристалла светлое пятно на экране будет резко отклоняться вверх. Если вынуть кристалл из пружинящих контактов и повернуть его на  $180^\circ$  вокруг его вертикальной оси и вновь монокристалл вставить между контактами, то теперь при каждом ударе по кристаллу электронный пучок будет резко отклоняться вниз; это свидетельствует о том, что поверхности кристалла сегнетовой соли при сжатии приобретают электрический заряд разных знаков.

\*) Если эксперимент ведется с электронным осциллографом ЭО-4, то на задней панели его имеются клеммы для непосредственного включения исследуемого напряжения на отклоняющие пластины, минуя входной усилитель; на эти клеммы следует подать напряжение от сегнетовой пластины.

При внимательном рассмотрении картин движения электронного пучка на экране при ударе по кристаллу легко заметить, что светлое пятно на экране совершает сильно затухающие колебания. Соответственно этому получаются затухающие колебания при другом положении кристалла в оправе прибора, когда начальный отброс электронного пучка направлен вниз. Явление колебательного процесса, возникающего при ударе по поверхности кристалла, следует объяснить тем, что при ударе кристалл сжимается и на его поверхностях возникают электрические заряды противоположных знаков. Когда сжимающее усилие исчезает, то кристалл возвращается к первоначальным размерам и по инерции его грани несколько растягиваются. Процесс растяжения пластины кристалла связан с электризацией его поверхностей электричеством противоположного знака. Колебания напряжения, возникающие при ударе молоточком по поверхности кристалла, регистрируются, как мы указали, электронным осциллографом.

*Несколько практических замечаний.* 1) Размеры сегнетовой пластины (45-градусный  $x$ -срез): 8 м.м.  $\times$  25 м.м.  $\times$  40 м.м.

2) В качестве индикатора берется небольшая неоновая лампа с цилиндрическими электродами (потенциал зажигания примерно 65 в). Для лучшей видимости разряда между электродами лампа закрепляется в подставке так, чтобы сечения ее цилиндрических электродов были обращены к аудитории.

3) Весь прибор смонтирован на небольшой эbonитовой панели. Для получения более упругого удара по кристаллу рекомендуется прибор расположить при демонстрировании на небольшой металлической плите.

4) Опыт следует демонстрировать в затемненном помещении.

#### 84. Обратный пьезоэффект

Для демонстрирования обратного эффекта в кристалле сегнетовой соли, т. е. для создания деформации кристалла под действием электрического поля, наложенного на его пластину, можно использовать тот же прибор, который был нами рассмотрен в предыдущих опытах (рис. 125).

От кристалла сегнетовой соли отключается неоновая лампа, а на пружинящие контакты прибора подается напряжение от лампового звукового генератора. Желательно подать на кристалл напряжение порядка 100—120 в, для чего необходимо между кристаллом и звуковым генератором поставить усилитель звуковой частоты (например У-50) \*). При достаточном напряжении, поданном на широкие пластины, кристалл начинает вибрировать в вертикальном направлении. При вибрировании кристалл издает звук, частота которого соответствует частоте наложенного на него переменного напряжения.

Рекомендуется менять частоту переменного напряжения звукового генератора и тем самым вызывать звучание кристалла на различных частотах.

При демонстрировании этого опыта рекомендуется прибор расположить на деревянной досочке, которая, резонируя на колебания кристалла, усилит звук. Можно на верхнюю поверхность кристалла опустить небольшую фанерную досочку, что также будет способствовать усилению звука.

Тем же способом можно подать на кристалл усиленное напряжение от лампового приемника. В этом случае пластина монокристалла сегнетовой соли будет являться репродуктором.

## 85. Пьезозвонок

Двойными пьезоэлементами (биморфами) называются такие сочетания из пластин сегнетовой соли, вырезанных в направлении максимального пьезоэффекта, которые дают возможность усилить наблюдаемый пьезоэффект и применить его для ряда технических целей. Различают три основных типа пьезоэлементов: элементы, реаги-

\*) Можно для этого опыта и ряда других воспользоваться звуковым генератором ЗГ-2А, выпускаемым нашей промышленностью. Диапазон частот 20—20 000 герц. Мощность генератора 2 вт. Эта мощность может быть снята с выходных клемм генератора при напряжении на них 20, 60 и 200 в. См. Г. П. Шкурин, Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военно-Морское издательство, 1950.

рующие на растяжение (или сжатие), на изгиб и на кручение \*).

Рассмотрим последние два типа пьезоэлементов, как наиболее часто встречающиеся в технике.

Две пластинки из кристалла сегнетовой соли, вырезанные в направлении максимального пьезоэффекта, склеиваются между собой таким образом, чтобы при изгибе, например вверх, внешние поверхности элемента заряжались одним знаком, а внутренние, склеенные между собой, другим знаком (рис. 126, *а* и *б*). Тогда при изгибе вниз знаки зарядов на внешних и внутренних поверхностях биморфа меняются на обратные (рис. 126, *в*). Если вызвать переменное изгибание такого элемента, то с его выводов можно получить переменный ток, частота которого равна частоте изгибов (вибраций) поверхностей элемента. Если, наоборот, к внешним и внутренним поверхностям двойного элемента подать переменный ток достаточного напряжения, то такой элемент начнет вибрировать. На этом принципе основано устройство так называемых пьезовибраторов, имеющих распространение в технике (остеофоны — костные телефоны, ларингофоны — гlandные микрофоны и т. д.) \*\*).

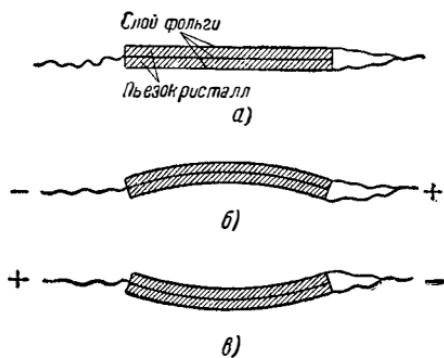


Рис. 126.

Выводов можно получить переменный ток, частота которого равна частоте изгибов (вибраций) поверхностей элемента. Если, наоборот, к внешним и внутренним поверхностям двойного элемента подать переменный ток достаточного напряжения, то такой элемент начнет вибрировать. На этом принципе основано устройство так называемых пьезовибраторов, имеющих распространение в технике (остеофоны — костные телефоны, ларингофоны — гlandные микрофоны и т. д.) \*\*).

В качестве демонстрационного опыта с пьезовибратором рассмотрим пьезозвонок. Сегнетовый, или пьезозвонок, состоит из пьезовибратора, к верхнему концу которого прикреплен изогнутый металлический стерженек, закан-

\* См. книги: А. В. Шубников, Пьезоэлектрическая текстура, Изд. АН СССР, 1946; В. А. Красильников, Звуковые волны, Гостехиздат, 1951.

\*\*) См. статью Л. Полевого «Опыты с пьезовибратором», «Радио», № 1, 1947.

чивающимся шариком. Шарик располагается на расстоянии 2—3 мм от металлической чашки, укрепленной тут же на общей подставке (рис. 127). При подаче на пластины пьезовибратора переменного напряжения (120 в, 50 гц) пьезоэлемент будет изгибаться и шарик пятьдесят раз в секунду будет ударяться о металлическую чашку звонка.

Примерные размеры двойного пьезоэлемента: длина сегнетовой пластиинки 80 мм, ширина 10 мм, толщина каждой пластиинки 1 мм. Все детали электрозвонка монтируются на небольшой общей панели, изготовленной из изоляционного материала.

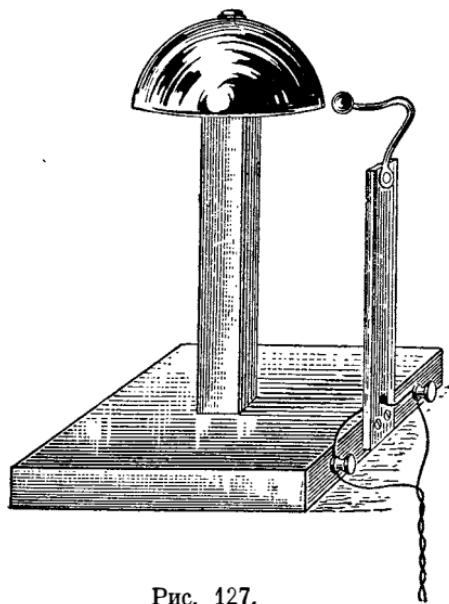


Рис. 127.

ботающих на кручение. Из монокристалла сегнетовой соли в плоскости, перпендикулярной к оси *аб*, вырезается тонкая квадратная пластиинка (см. рис. 124). Если подать на широкие грани такой пластиинки постоянное электрическое напряжение, то, как это было изложено выше, электризация пластины вызовет ее деформацию: одна диагональ будет удлиняться, вторая — укорачиваться (деформация сдвига).

Для изготовления двойного пьезоэлемента, работающего на деформации кручения, необходимо взять две одинаковые по размерам квадратные пластины, вырезанные вышеуказанным способом, и склеить их вместе широкими гранями, предварительно повернув одну из них на угол 90°. При подаче достаточного напряжения на

## 86. Пьезотелефон и пьезомикрофон

Рассмотрим устройство пьезоэлементов, ра-

пластины такого пьезоэлемента вся пластина в целом будет испытывать деформацию кручения. Если подавать переменное напряжение, то сегнетовые пластины будут седлообразно скручиваться с частотой прикладываемого напряжения. Подобные пьезоэлементы применяются при изготовлении телефонных трубок; см. рис. 128.

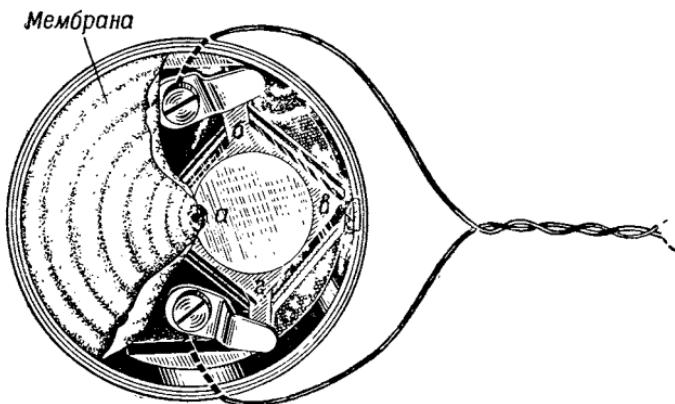


Рис. 128.

Пьезоэлемент с площадью пластины  $25 \text{ м.м.} \times 25 \text{ м.м.}$ , работающий на кручение, прикрепляется своими тремя углами  $b$ ,  $v$  и  $g$  к внутренней поверхности небольшой плоской цилиндрической коробки (футляр обычной телефонной трубки), а четвертым углом  $a$  — к тонкой алюминиевой мемbrane. На рис. 128 показано устройство пьезотрубки. Часть мембранны, находящаяся над чувствительным элементом, для наглядности рисунка не изображена. При подаче переменного напряжения (через места крепления  $b$  и  $g$ ) на широкие грани такого сегнетоэлемента весь элемент будет скручиваться, а четвертый конец его будет колебаться, вызывая этим колебания мембранны.

Примерно так же устроен пьезорепродуктор. Рекомендуется показать на лекции работу пьезотелефона и пьезорепродуктора. Полезно сравнить работу пьезотелефона с электромагнитным телефоном. Пьезотелефон

приблизительно в три раза чувствительнее электромагнитного \*).

Рассмотренные выше пьезотелефоны могут работать в качестве микрофона. При демонстрации работы пьезомикрофона и пьезорепродуктора в большой аудитории необходимо их связать между собой усилителем низкой частоты. Если перед микрофоном расположить небольшой будильник, то тикание часов будет хорошо слышно во всей аудитории.

Чувствительность пьезомикрофона и пьезотелефона в общем настолько велика, что с помощью этих аппаратов возможно осуществить телефонную связь без источника тока. Подобная безбатарейная связь нашла себе применение в настоящее время в технике связи. Для демонстрации этой связи достаточно соединить тонким звонковым проводом между собой пьезотелефон и пьезомикрофон. При отсутствии пьезомикрофона можно воспользоваться для этого опыта двумя пьезотелефонами.

В классной обстановке весьма убедительна такая демонстрация: один из учащихся шепотом говорит в трубку, в то время как другой, находящийся в соседней комнате или в другом конце класса, отчетливо слышит говорящего; затем первый слушает, а второй, находящийся вне комнаты, говорит в телефонную трубку. С пьезоэлектрической телефонной трубкой можно показать еще ряд опытов, на которых мы не останавливаемся.

## 87. Пьезотекстура

Если взять поликристалл сегнетовой соли и сжать его или подать на него электрическое напряжение, то ни прямой, ни обратный пьезоэффекты не удается наблюдать, так как деформации отдельных кристаллов или их электризации будут направлены по разным кристалло-

\*) К недостаткам пьезотелефона, как и всей сегнетопродукции, следует отнести ее гигроскопичность. Для устранения этого недостатка пьезоэлемент помещается обычно в герметичный пакетик и залепивается. Это достаточно хорошо предохраняет элемент от влаги.

графическим направлениям, что в среднем дает нулевой эффект.

На рис. 129 дан снимок поликристаллического куска сегнетовой соли.

Если искусственно в поликристалле создать преимущественное расположение отдельных мелких монокристаллов в одном определенном направлении, то такой агрегат

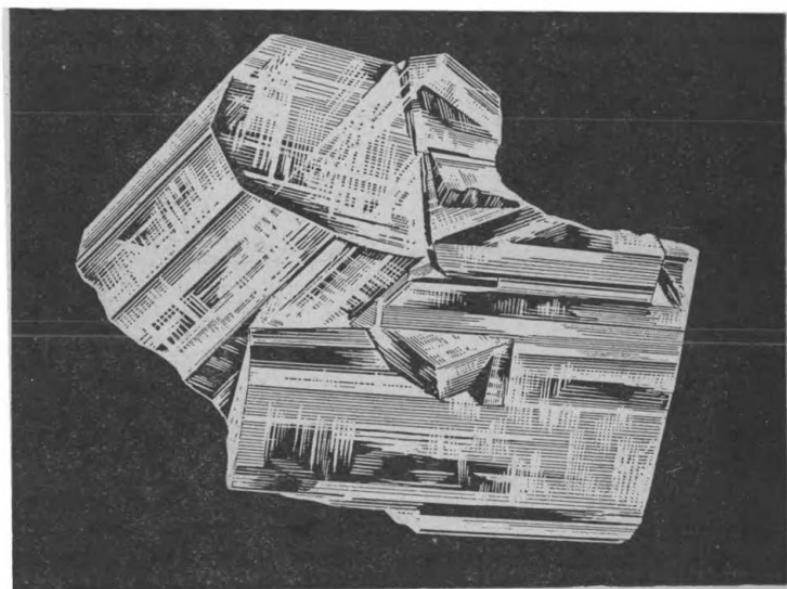


Рис. 129.

из монокристаллов будет обладать в целом определенными анизотропными свойствами. Подобные поликристаллы называются текстурованными или просто текстурами. Впервые в 1940 г. член-корреспондент АН СССР Шубников А. В. высказал предположение о возможности получения искусственных пьезоэлектрических текстур. Такие текстуры вскоре после этого были получены в руководимой им лаборатории. А. В. Шубников предложил также использовать текстурованные пластины из сегнетовой соли для технических и демонстрационных целей.

Поскольку для выращивания больших монокристаллов требуются специальные лабораторные условия, а изготовление пьезотекстур возможно осуществить в физическом кабинете вуза, то мы опишем несколько демонстраций с пьезоэлектрическими текстурами \*).

Для демонстрационных целей желательно взять пьезотекстурованные пластины примерно следующих размеров: 8 м.м.  $\times$  150 м.м.  $\times$  200 м.м. Однако опыты получаются достаточно наглядными с пластинами и меньшего размера. Способ приготовления текстурованных пластин излагается нами ниже, см. стр. 211.

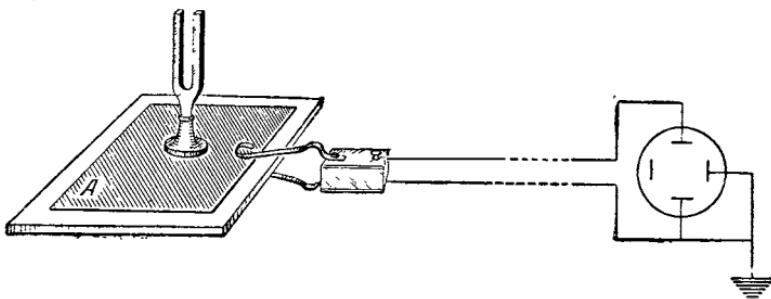


Рис. 130.

**Прямой пьезоэффект с текстурованной пластиной.** Наклеенные на верхнюю и нижнюю поверхности текстурованной пластины *A* слои металлической фольги присоединяются к вертикально отклоняющим электродам электронного осциллографа ЭО-4 или ЭО-5 (рис. 130). Осциллограф включается в цепь переменного тока; на флюоресцирующем экране прибора получается светлое пятно.

Поставим теперь на верхнюю поверхность пластины *A* звучащий камертон. Под влиянием вибраций стебля камертона на верхней и нижней поверхностях пьезопластины возникает переменное напряжение, частота которого соответствует собственной частоте камертона. Для наблюдения возникших электрических колебаний на экране осциллографа включим вертикальный усилитель, имею-

\*) См. А. В. Шубников, Пьезоэлектрическая текстура, Изд. АН СССР, 1946.

щийся в фабричных образцах прибора, и, вращая ручку его регулятора, добьемся растяжения светлого пятна по экрану в вертикальную полоску, равную по длине  $\frac{3}{4}$  диаметра экрана. Удалим камертон, и светлая полоса превратится в точку. Поставим вновь звучащий камертон — точка снова растягивается в линию. При ослаблении звучания камертона будем наблюдать за постепенным уменьшением вертикальной линии на экране. Когда звучание камертона прекратится, светлая полоса на экране опять стянется в точку.

Этот опыт можно проводить, подавая напряжение от генератора развертки на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа. Подберем частоту развертки такой, чтобы полученная на экране синусоида не передвигалась. В этом случае частота развертки равна собственной частоте камертона. Вследствие относительно быстрого ослабления звучания камертона эту операцию необходимо производить в несколько приемов.

Этот опыт можно поставить несколько иначе. Электроды текстурованной пластины *A* соединяются со входом усилителя низкой частоты (например У-50). Выводы усилителя присоединяются к неоновой лампе. При достаточной степени усиления напряжения можно наблюдать свечение неоновой лампы при опускании звучащего камертона на верхнюю плоскость пластины. Когда интенсивность звучания камертона заметно снизится, неоновая лампа перестанет светиться.

Прямой эффект с текстурованной пластины можно показать еще иначе. Электроды текстурованной пластины соединяются со входом усилителя низкой частоты, а выводы усилителя — с репродуктором. Теперь индикатором появления на поверхностях текстурованной пластины переменных напряжений будет являться звучащий репродуктор. По мере затухания колебаний камертона звук, воспроизведенный репродуктором, будет ослабевать.

При подъеме камертона, т. е. при нарушении механического контакта между текстурованной пластины и камертоном, звучание резко ослабевает, так как теперь звучит в аудитории один камертон.

Опыт следует повторить, опуская на текстуированную пластину камертон другой частоты или сразу два камертона разной частоты.

*Практические замечания.* 1) Камертон следует укрепить в небольшой деревянной стойке. Стойку надо просверлить насеквоздь вдоль оси. В этот канал вставляется камертон так, чтобы конец его стебля доходил до основания стойки.

2) При постановке этих опытов следует помнить, что текстуированная пластина, включенная на вход усилителя, обладает определенной емкостью. При опускании на пластину звучащего камертона рука демонстратора меняет емкость системы, что может оказаться на наблюдаемом эффекте. Особенно это заметно при демонстрировании опыта с неоновой лампой. Поэтому рекомендуется поставить в схеме выключатель и разрывать цепь индикатора в момент опускания камертона на пластину и при его удалении.

3) Полезно соединения пластины с осциллографом произвести бронированным проводом.

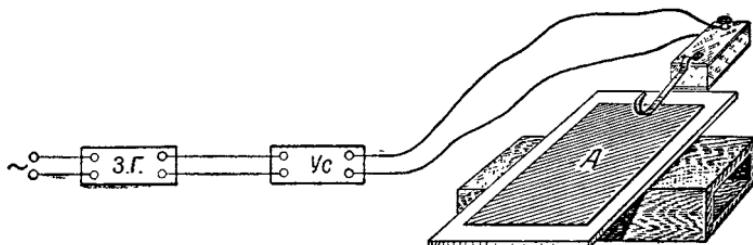


Рис. 131.

#### Обратный пьезоэффект с текстуированной пластиной.

Электроды текстуированной пластины присоединяются к звуковому генератору. Если напряжение, получаемое от звукового генератора, недостаточно, то между генератором и пластиной включается усилитель низкой частоты, подымающий напряжение до 60—100 в (рис. 131). При этих условиях пьезотекстура будет колебаться в соответствии с подаваемыми от генератора частотами. Следовательно, текстуированная пластина может служить генера-

тором механических колебаний в значительном диапазоне частот. В данном случае пластина играет роль репропродуктора.

Для усиления звучания пластины ее можно положить на деревянную дощечку или коробку.

Интересен такой вариант опыта. Текстурованная пластина кладется на резонаторный ящик от камертона (рис. 131).

Если частоту переменного тока, получаемого от генератора, подобрать таким образом, чтобы она равнялась частоте колебаний, на которые резонирует столб воздуха внутри ящика, то звучание всей установки резко возрастет. Это явление резонанса следует показать, подходя к нему как со стороны более низких частот, чем резонансная частота ящика, так и со стороны частот более высоких.

*Практические указания.* 1) Способы приготовления текстурованной сегнетопластины. В водяной ванне помещается небольшой химический стакан, заполненный мелкими кристаликами сегнетовой соли. При температуре 63°С соль начинает плавиться. Когда температура расплава в стакане достигает 100°С, можно приступить к приготовлению текстурованной пластины. Для этого в расплавленную соль опускают жесткую цилиндрическую кисть диаметром 10—15 м.м., а когда кисть приобретет температуру расплавленной соли, то, несколько отжав кисть о внутренние стенки сосуда, наносят кистью расплав на очищенную поверхность металлической или стеклянной пластины. Проводить кистью следует только в одном направлении, накладывая слои соли, например, от левого края пластины к правому.

Когда соль начнет застывать, о чем можно судить по появлению блеска, то следует прекратить движение кисти по поверхности металла и дать хорошо застыть наложенному слою сегнетовой соли. На это время следует опустить кисть в расплав соли; кристалики соли, закристаллизовавшейся на кисти в процессе нанесения слоя, расплавляются, и кисть вновь приобретет температуру расплава. Затем опять берется кистью небольшое

количество расплава и вновь наносятся штрихи по металлической или стеклянной пластины. Теперь необходимо проводить кистью в противоположном направлении, т. е. в нашем случае от правого края пластины к левому. Второй слой расплава наносится по поверхности первого слоя или рядом с ним, и т. д. Таким образом можно получить пластины любой толщины (см. А. В. Шубников, цит. выше).

Пластина не сразу способна проявлять в достаточной степени пьезоэлектрические свойства: должно пройти несколько дней, пока аморфные частицы, окружающие отдельные кристаллиты, также закристаллизуются; в этом

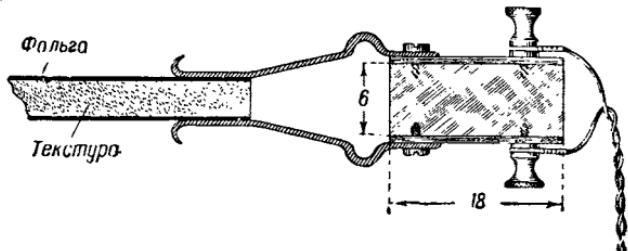


Рис. 132.

случае уменьшается проводимость сегнетовой пластины, что способствует усилению наблюдаемого эффекта.

2) Приклеивание электродов к поверхности текстурованной пластины осуществляется таким образом: поверхность текстуры слегка увлажняется водой, затем на поверхность пластины кладется несколько меньший по площади лист алюминиевой или оловянной фольги, который сверху покрывается листом бумаги, затем поверхность бумаги тщательно протирается тампоном ваты. Эту операцию необходимо производить осторожно, так как текстурованная сегнетопластина хрупка. После этого бумага убирается. Нижняя поверхность текстурованной пластины может быть покрыта фольгой в процессе получения самой текстуры. Для этого на металлическую или стеклянную пластину кладется выравненный лист фольги, и операция наложения кистью расплава соли производится по поверхности фольги. Когда текстура затвердеет, ее снимают ножом со стеклянной пластиинки.

3) Прикрепление отводов к металлизированным поверхностям сегнетовой пластины можно произвести многими способами. Наиболее прост такой прием. Изготавливаются небольшие контактные щипцы, которые охватывают пластину с двух сторон (рис. 132). На верхней и нижней поверхностях щипцов крепятся небольшие клеммы. Между поверхностями щипцов прокладывается слой эбонита или другого изолирующего материала.

**Камертон с нанесенным слоем сегнетовой соли.** На внешнюю или внутреннюю поверхность одной из ветвей камертона наносится слой сегнетовой соли (рис. 133). Расплав сегнетовой соли необходимо наносить кистью под углом  $45^\circ$  к ребрам ветвей. После наложения на поверхность камертона слоя текстуры толщиной 1—1,5 мм и прикрепления к внешней поверхности ее слоя фольги камертон оставляют в покое на несколько дней для «дозревания» текстуры. Затем выводы от внешней и внутренней поверхностей текстурованного слоя присоединяют к вертикально отклоняющим пластинам электронного осциллографа. Выводом от внутренней поверхности сегнетоэлектрического слоя может служить тело самого камертона. Если теперь возбудить камертон, то колебания его ветвей вызовут появление переменной электродвижущей силы на поверхностях пьезоэлектрического слоя, которое будет отмечено осциллографом.

Напряжение от сегнетового слоя, наложенного на камертон, можно подать через усилитель на репродуктор (подробно см. в предыдущей демонстрации).

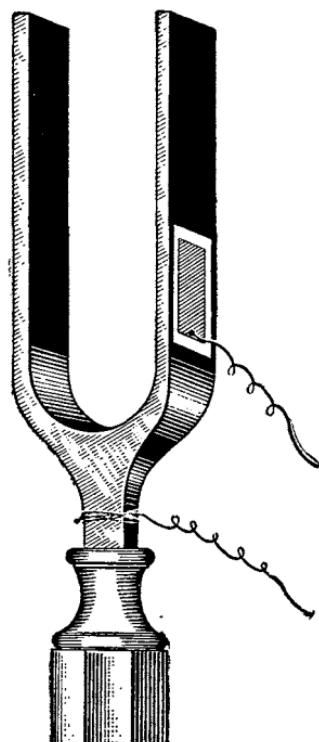


Рис. 133.

*Практические указания.* 1) Слой сегнетовой соли наносится на камертон вблизи стебля.

2) Провод, прикрепляемый к внешней поверхности камертона, должен быть тонким и гибким, чтобы не мешать колебаниям камертона.

## XVI. УЛЬТРАЗВУК

Колебания, частота которых выше частоты звука, слышимого нормальным человеческим ухом, обычно называются ультразвуковыми колебаниями. Продольные колебания в этом диапазоне частот могут наблюдаться в газообразных, жидких и твердых телах. Ультразвуковые колебания нашли широкое применение в различных отраслях техники и науки: подводная сигнализация и связь, гидролокация и дефектоскопия металлических изделий, биология и медицина, химия и физика.

Существует много способов получения ультразвуковых колебаний. Однако в современной технике применяются обычно только два приема. Первый прием основан на использовании пьезоэлектрического эффекта кварца, сегнетовой соли и турмалина; второй прием — на использовании магнитострикционного эффекта, наблюдаемого в ферромагнитных стержнях.

В физическом кабинете МГУ этот круг вопросов иллюстрируется несколькими опытами.

### 88. Ультразвуковые колебания кварца

Монокристалл кварца представляет собой шестигранную, окантованную пирамидоподобными сужениями на концах, призму (рис. 134). В кварце выделяют обычно три главные оси: электрическую, механическую и оптическую. Обычно эти оси обозначают буквами  $x$ ,  $y$  и  $z$ . Наибольший пьезоэффект наблюдается в направлении электрической оси. Пластины, вырезанные так, как показано на рис. 134, принято называть пластиной  $x$ -среза. При растяжении пластины кварца  $x$ -среза в направлении оси  $x$  поверхности пластины электризуются; при сжатии знаки зарядов меняются на обратные. Степень электри-

зации кварца пропорциональна приложенной к пластине силе. Если к верхней и нижней поверхностям пластины  $x$ -среза приложить переменное электрическое напряжение, то пластина кварца будет деформироваться (растягиваться и сжиматься) с частотой приложенного к ней переменного электрического напряжения. Амплитуда деформации кварцевой пластины достигает наибольшего значения тогда, когда частота приложенного переменного электрического напряжения совпадает с собственной частотой кварцевой пластины.

Основная собственная частота кварцевой пластины рассчитывается по формуле

$$\nu = \frac{c}{\lambda},$$

где  $\nu$  — частота упругих колебаний кварца,  $c$  — скорость упругих продольных колебаний в кварце (5500 м/сек) и  $\lambda$  — длина волны в кварце.

При резонансе в пластине кварца устанавливается стоячая волна, половина которой равна толщине кварцевой пластины  $d$ . Исходя из этого, приведенную формулу можно переписать иначе:

$$\nu = \frac{c}{2d}.$$

Следовательно, чем тоньше кварцевая пластина, тем на более высоких частотах должен работать ламповый генератор, возбуждающий эту пластину.

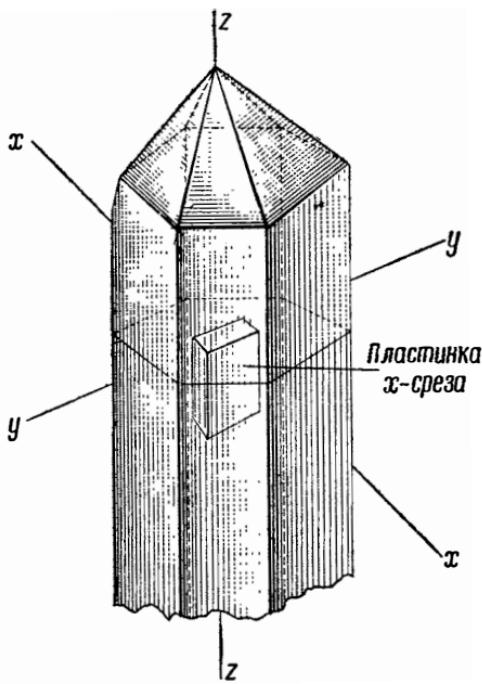


Рис. 134.

Кварцевая пластина может быть возбуждена не только на основной волне, но и на ее обертонах. При возбуждении кварца на его обертонах по толщине кварцевой пластины укладывается  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$  и т. д. волн. В этом случае частота переменного тока, возбуждающего кварцевую пластину, должна быть соответственно увеличена.

Перейдем теперь к рассмотрению опытов с кварцевой пластиной.

**Фонтан в жидкости под действием ультразвуковых колебаний кварца.** Пластиинке кварца, вырезанной в плоскости максимального пьезоэффекта ( $x$ -срез), придается форма небольшого диска. Поверхности кварцевой пластины тщательно шлифуются. На нижнюю и верхнюю поверхности кварцевой пластины кладется алюминиевая или оловянная фольга и специально изготовленными для этой цели контактами прижимается к кварцу. Однако лучшие результаты получаются, если поверхность кристалла металлизирована. Здесь возможно рекомендовать следующие приемы: а) катодное распыление алюминия, б) испарение серебра в вакууме или в) химическое серебрение. Однако в последнем случае боковые поверхности кварцевой пластины будут также покрыты металлом и после покрытия пластины приходится очищать, соскабливая лишний слой серебра. В первых двух приемах оградить боковую поверхность кристалла от лишнего слоя металла проще.

Для получения ультразвуковых колебаний кварца в жидкости и для демонстрирования их в аудитории необходимо кварцевый диск расположить в специальном держателе. Держатель представляет собой кольцо, выточенное из эбонита; внутренний диаметр кольца равен диаметру кварцевого диска (рис. 135). Внизу кольцо закрыто металлическим дном, на которое кварц опирается своей нижней металлизированной поверхностью. Сверху кварцевый диск покрывается металлическим кольцом, внутренний диаметр которого несколько меньше диаметра кварца. Это кольцо прижимается к эбониту четырьмя небольшими винтами, осуществляя тем самым хороший электрический контакт с верхней поверхностью кристал-

ла. Все металлические части держателя следует посеребрить в электролитической ванне.

Ко дну держателя и к верхнему металлическому кольцу подается напряжение от высокочастотного генератора. Держатель вместе с квартцем опускается в стеклянный кубической формы сосуд, заполненный почти полностью бензолом. В целях уменьшения вибрации дна сосуда весь держатель кварца находится в жидкости навесу. Для

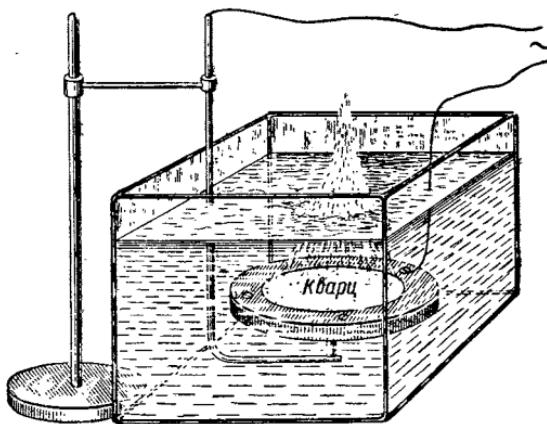


Рис. 135.

этого металлическое дно держателя скрепляется с изогнутым металлическим стержнем, который в свою очередь укрепляется в небольшом, но устойчивом штативе. При подаче на квартц достаточно интенсивного высокочастотного напряжения, приближающегося по частоте к собственной частоте квартца или к его гармоникам, на поверхности жидкости появляется волнение, которое превращается в небольшой фонтан высотой 5—8 см при точном совпадении собственной частоты квартца с частотой подаваемого на него от генератора напряжения. Отдельные брызги фонтана поднимаются на большую высоту. При интенсивных колебаниях квартца над поверхностью жидкости в сосуде возникает густой туман, образованный парами бензола. При проектировании фонтана на экран туман необходимо сдувать.

*Практические указания.* 1) Опыты получения фонтана в жидкости в физическом кабинете МГУ ставятся с кварцевыми дисками разного размера: например, диаметр  $\approx 50$  мм, толщина  $\approx 2,7$  мм; или диаметр  $\approx 25$  мм, толщина  $\approx 2,7$  мм.

Мощность получаемых колебаний пропорциональна поверхности пластин. Наиболее хорошие результаты получаются с кварцевыми пластинами, которым придана вогнутая форма. Для каждого размера кварца следует иметь отдельный держатель.

2) Для получения достаточно интенсивных ультразвуковых колебаний жидкости необходимо к поверхности кварцевой пластины подвести значительное по величине переменное напряжение. На 1 мм толщины кварца следует подавать до 300—500 в высокочастотного напряжения. Приведенные цифры следует считать ориентировочными, так как предельные значения подаваемого на кварц напряжения в конечном счете определяются изоляционными и пробойными свойствами жидкости, взятой для рассматриваемого эксперимента.

3) Измерение напряжения высокочастотного тока производится ламповыми вольтметрами. Ламповый вольтметр ВК-2 имеет предел измерения до 1000 в; ламповый вольтметр ВКС-7Б (с делителем напряжения) — до 10000 в \*).

4) Физический кабинет МГУ использовал для постановки этого опыта ламповый генератор мощностью 100 вт, работающий в диапазоне частот от 300 до 1200 кгц. Напряжение, подаваемое на аноды ламп генератора, достигает 1000—1500 в.

**Получение эмульсий с помощью ультразвука.** Вогнутая кварцевая пластина, обращенная вогнутостью кверху, укрепляется в держателе, висящем на стенках большого, прямоугольной формы стеклянного сосуда, наполненного на  $\frac{3}{4}$  высоты чистым керосином (рис. 136). Если на кварцевую пластину подать высокое напряжение, совпадающее по частоте с собственной частотой кварца, то

\* ) См. Шурип Г. П., Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Военно-морское издательство, 1950.

кварц начнет вибрировать. От вогнутой поверхности кварца пойдет вверх сферическая ультразвуковая волна, сходящаяся на некотором расстоянии от поверхности в одной точке (в фокусе). В фокусе действие ультразвукового излучения на жидкость будет наибольшим. Если вогнутая пластина кварца расположена в керосине примерно на глубине ра-

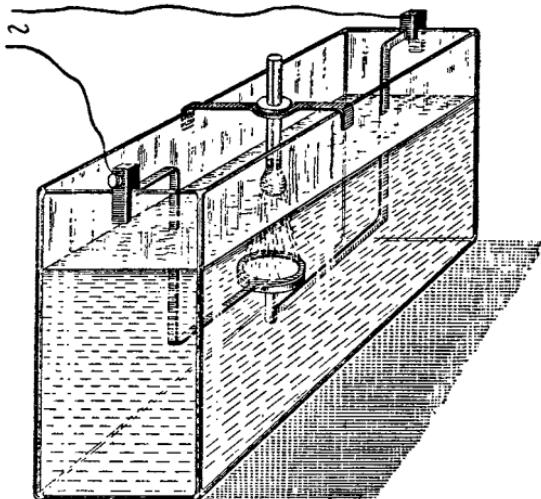


Рис. 136.

диуса кривизны ее поверхностей, то условия образования фонтана в этом случае будут наиболее благоприятными.

С вогнутым кварцем диаметром  $\approx 50$  мм и толщиной  $\approx 2,9$  мм и с радиусом кривизны  $\approx 100$  мм нетрудно получить фонтан керосина высотой до 18—20 см \*).

Поместим теперь в фонтан керосина небольшую пробирку, наполненную 3—4 см<sup>3</sup> воды и примерно таким же количеством трансформаторного масла. Пробирку следует расположить в фонтане таким образом, чтобы струя керосина била в ее дно. При таком расположении пробирки фонтан керосина прекратится, зато смешиваемые

\*). На кварц подается напряжение от лампового генератора, о котором мы упоминали в предыдущей демонстрации.

жидкости в пробирке придут в интенсивное движение. Теперь внутри самой пробирки можно увидеть небольшой фонтан. После воздействия в течение 3—5 минут на волну и масло концентрированным ультразвуковым излучением жидкости перемешаются между собой, превратившись в эмульсию молочного цвета.

Точно такой же опыт можно произвести с тем же количеством воды и с несколькими каплями ртути.

Величина фонтана настолько велика, что нет надобности проектировать опыт даже в большой аудитории. Убедительность опыта усиливается весьма интенсивным образованием густого тумана керосина вокруг фонтана.

*Практические указания.* 1) Для постановки этих опытов удобно взять сосуд от аккумуляторной батареи. Размеры сосуда: 8 см × 20 см × 27 см.

2) Держатель для кварца имеет следующий вид: вогнутая чашка, радиус кривизны которой равен кривизне поверхности кварца, припаяна к изогнутому стержню. Стержень скреплен с эbonитовой скобой, прочно насаживаемой на боковую стенку сосуда. Такое крепление обеспечивает устойчивое положение кварцевой пластины внутри жидкости и достаточный контакт выпуклой поверхности кварца с одним из полюсов генератора. На вогнутую поверхность кварца кладется узкое металлическое кольцо, с которым соединяется второй полюс генератора. Кольцо точно таким же образом, как и чашка, спаяно с изогнутым стержнем, который в свою очередь крепится на противоположной стенке сосуда (рис. 136).

3) Опыт получения эмульсии следует производить в пробирке с возможно более тонкими стенками. Если такой пробирки нет под руками, то ее можно изготовить таким упрощенным способом. Конец обыкновенной пробирки прогреваем в сильном пламени газовой горелки и, вдувая в пробирку воздух, увеличиваем объем ее конца примерно в 1,5—2 раза, что соответственно уменьшает толщину стенок пробирки.

4) В целях удобства проведения эксперимента пробирку следует укрепить в небольшом деревянном держателе, опирающемся на стенки сосуда (см. рис. 136).

5) Для большей убедительности опыта необходимо наполнить две пробирки одинаковыми количествами воды и масла и показать на экране резкую границу между маслом и водой в обеих пробирках. Затем одну из пробирок подвергают воздействию ультразвукового поля и, получив в ней эмульсию масла в воде, вновь на экране сравнивают эту пробирку с той пробиркой, где подобного смешения не происходило.

6) Во избежание вредного излучения в пространство генератором электромагнитных волн подачу напряжения от клемм «антенна» и «земля» на поверхность кварца следует вести бронированным проводом.

**Химическое действие ультразвуковых волн.** В пробирку наливается водный раствор иодистого калия произвольной концентрации. Как известно, этот раствор бесцветен и прозрачен, как вода. Под воздействием интенсивного в течение 2—3 минут ультразвукового поля в растворе возникает химическая реакция, которая внешне проявляется в виде выделения чистого иода, окрашивающего раствор в светло-желтый цвет.

Опыт следует вести в большой аудитории путем сравнения раствора иодистого калия до озвучивания и после него с пробиркой того же раствора, но не подвергавшегося действию ультразвука.

Пробирка с раствором иодистого калия располагается в фонтане керосина так, как мы рекомендовали это делать в опыте получения эмульсии масла в воде (рис. 136).

**Дифракция света на ультразвуковых волнах в жидкости.** При ультразвуковых колебаниях погруженной в жидкость кварцевой пластины возникают волны. Длина волны зависит от частоты колебаний кварца и от скорости распространения упругого импульса в жидкости. Следовательно, в жидкости, куда помещен вибрирующий кварц, возникают зоны уплотнения и разрежения. Если через такой сосуд с прозрачной жидкостью, где установилась проходящая или стоячая ультразвуковая волна, пропустить пучок света, то эти зоны уплотнения и разрежения и р'ют роль пространственной дифракционной решетки.

Для демонстрирования этого явления в аудитории следует собрать следующую установку. В небольшой

кубической формы сосуд, заполненный химически чистым толуолом или ксиолом, опускается закрепленная в держателе тонкая кварцевая пластинка  $x$ -среза (рис. 137). Затем на экран аудитории проектируется резкое изображение щели. За объективом в том месте, где ставится обыкновенная дифракционная решетка (см. спосо-

бы демонстрирования дифракционных спектров — «Лекционные демонстрации по физике», вып. 4), располагается сосуд с толуолом и с опущенным в него квартцем. На пластину кварца подается высокочастотное напряжение от лампового генератора. Изменением частоты колебаний лампового генератора добиваются совпадения

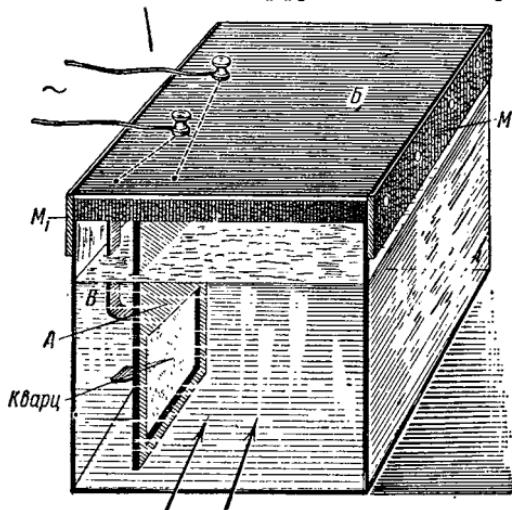


Рис. 137.

частоты подводимого к пластинке кварца переменного напряжения с одной из собственных частот кварца. Если интенсивность колебаний кварца будет достаточно велика, то на экране аудитории появится четкая картина дифракционных спектров.

Полезно на той же проекционной установке для сравнения показать дифракционный спектр от обычной плоской дифракционной решетки, располагая ее вместо сосуда с жидкостью. Желательно подобрать для этого сравнительного опыта дифракционную решетку с такой постоянной, чтобы на экране получались примерно одинаковые дифракционные спектры. Если ламповый генератор рассчитан на значительный диапазон частот, то желательно получить дифракционную картину на ультразвуковых волнах, возбуждая кварцевую пластину на другой волне.

*Практические указания.* 1) В физическом кабинете МГУ этот опыт ставится с кварцевой пластиной следующих размеров: толщина 0,4 *мм*, сечение 27 *мм*  $\times$  27 *мм*. Обе поверхности кварца посеребрены.

2) Кварц укрепляется в специальном, для этой цели изготовленном, держателе. Держатель представляет собой плоскую металлическую пластину *A* с квадратным вырезом в нижней части (рис. 137). Площадь выреза несколько меньше площади кварцевой пластины. Кварцевая пластина прижимается к этому вырезу с задней стороны держателя и удерживается в этом положении упругой контактной пружиной *B*. Держатель *A* и контактная пружина *B* прикрепляются небольшими болтиками к эbonитовой панели *B*. На верхней поверхности панели укрепляются две клеммы для подачи высокочастотного напряжения, которые проводами в свою очередь соединяются с держателем *A* и пружиной *B*. Панель *B* снабжается с двух сторон металлическими пружинящими напусками *M* и *M*<sub>1</sub>, которые обеспечивают устойчивое положение панели на стеклянном сосуде.

3) Сосуд для постановки этого опыта желательно взять кубической формы со стеклянными стенками. Величина ребра сосуда примерно 70—80 *мм*. Сосуд наполняется исследуемой жидкостью почти до краев.

4) Для получения отчетливой картины на экране необходимо предварительно добиться хорошей центрировки всей оптической системы. Экран не следует располагать далеко от проекционной установки (не больше 3 *м*). При невозможности передвигать проекционный фонарь относительно экрана, висящего на стене аудитории, рекомендуется пользоваться передвижным экраном.

При демонстрации этого опыта в большой аудитории рекомендуется передвижной экран расположить под углом к падающим на него лучам, причем так, чтобы дифракционный спектр был растянут на экране по горизонтали.

5) Ламповый генератор, возбуждающий кварцевую пластину, собирается по схеме пуш-пул на двух лампах, например типа УО-186. Напряжение, подаваемое на анод лампы, порядка 300 *в* при напряжении накала 4 *в*.

### 89. Магнитострикционные колебания

Свойство тел изменять свои размеры и форму при намагничивании называется магнитострикцией. Относительно сильно по сравнению с другими телами это свойство проявляется у ферромагнитных веществ (никель, железо и др.). Магнитострикция может иметь как положительное, так и отрицательное значения. Так, например,

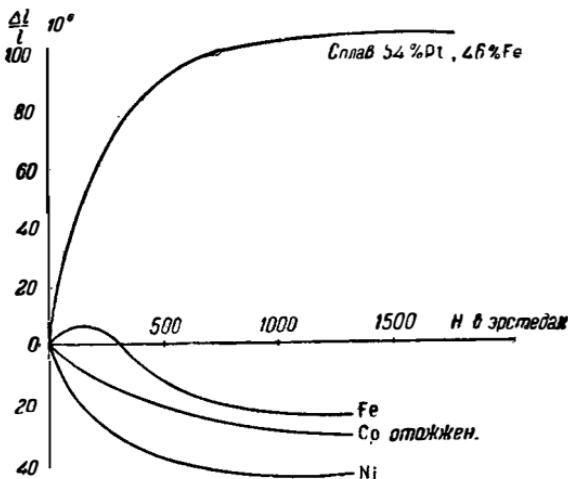


Рис. 138.

образцы из никеля при их намагничивании укорачиваются (отрицательная магнитострикция); образцы из сплава платины с железом или пермаллоя (сплав никеля и железа) при намагничивании удлиняются (положительная магнитострикция). Некоторые ферромагнетики, например техническое железо, ведут себя при намагничивании более сложно, чем никель или пермаллои: в слабых магнитных полях железные стержни удлиняются, в относительно сильных укорачиваются (рис. 138). Явление магнитострикции нашло довольно широкое применение в технике \*).

\*) См. Белов К. П., Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах, Гостехиздат, 1951.

В лабораторных условиях магнитострикция ферромагнитных образцов измеряется многими способами. Наиболее эти способы: 1) метод механо-оптического рычага, 2) интерференционный метод (предложен Розингом Б. Л.), 3) метод проволочных тензометров (предложен Акуловым Н. С. и Волковым Д. И.), 4) дилатометрический метод. Почти все перечисленные методы измерения магнитострикции можно использовать в демонстрационной практике. Один из этих приемов — интерференционный метод — описан в выпуске 3 «Лекционных демонстраций по физике» (стр. 102). Здесь мы рассмотрим метод измерения магнитострикции с помощью так называемого механо-оптического рычага. Этот прием наиболее убедителен и прост в демонстрационном отношении.

**Магнитострикция никелевой проволоки в постоянном магнитном поле.** Длинная цилиндрическая катушка *А* укрепляется вертикально на устойчивой деревянной подставке (рис. 139, *а*). Вдоль оси канала катушки располагается никелевая проволока диаметром 0,5—0,7 мм. Нижний конец проволоки закрепляется винтом в неподвижном держателе *Б*, а верхний конец — в подвижном плоском держателе *В*. Держатель *В*, а вместе с ним и вся никелевая проволока, оттягивается пружиной *Д*, прикрепленной одним из своих концов к середине горизонтальной рамы прибора. К правой вертикальной стойке прибора прикрепляется горизонтальный держатель *Е*, несущий на себе металлический, плоский с торцевых поверхностей, стержень *С*. Расположение частей прибора так подогнано друг к другу, что держатель *В* и стержень *С* касаются друг друга своими плоскими поверхностями. Между этими плоскостями располагается цилиндрический стерженек длиной  $\approx 50$  мм, к образующей которого, вблизи одного из его концов, прикреплено шеллаком небольшое зеркало *З*. На противоположном конце стерженька прикрепляется небольшой противовес (восковой или сургучный шарик). На рис. 139, *б* дан отдельно вид стерженька с зеркалом, если смотреть на него со стороны экрана (пунктиром отмечена плоскость держателя *В*). Цилиндрический стерженек удерживается силой трения между плоскостями держателя *В* и стержня *С*.

Если пустить на зеркало прибора пучок света, то отраженный луч света будет фиксировать на экране начальную длину никелевой проволоки. Теперь включим в обмотку катушки  $A$  постоянный электрический ток и намагнитим никелевую проволоку. Вследствие магнито-стрикционных свойств последняя укоротится и вызовет

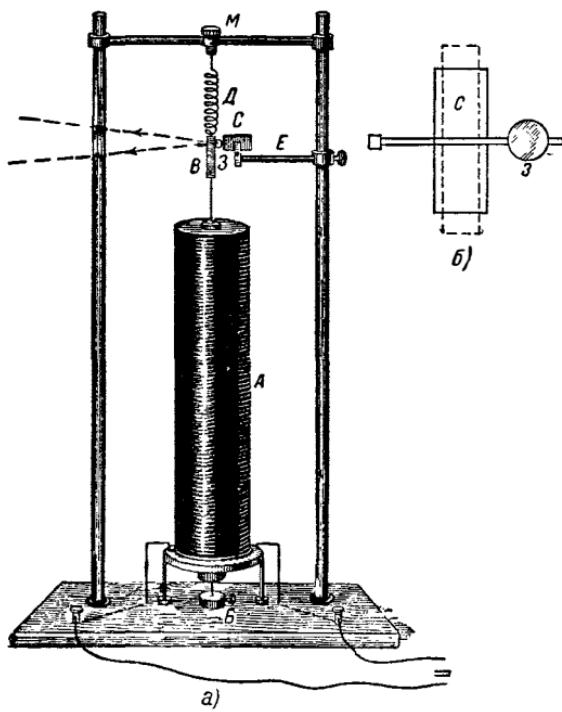


Рис. 139.

соответствующее опускание стержня  $B$ , который в свою очередь заставит повернуться зеркальце  $3$  на небольшой угол. Под влиянием этих механических передвижений след от луча света на экране опустится вниз. При выключении тока никелевая проволока приобретет начальную длину и след луча на экране вернется в начальное положение \*).

\*) Остаточным намагничением проволоки и, следовательно, остаточной магнитосприцей мы пренебрегаем.

Следует помнить, что укорочение никелевой проволоки при намагничивании невелико. Даже при намагничивании ее до насыщения относительное уменьшение длины проволоки достигает всего лишь  $3,6 \cdot 10^{-5}$ . Поэтому для получения на экране аудитории хорошо заметного сдвига следа светового луча, отраженного от зеркала прибора, необходимо: 1) взять достаточно длинную проволоку; 2) намагничивать ее до значительных степеней намагничения; 3) цилиндрический стержень, на котором крепится зеркало, следует брать небольшого диаметра, примерно 0,5 мм, и 4) прибор следует располагать на расстоянии не меньшем, чем 4—5 м от экрана.

В приборе, изготовленном для физического кабинета МГУ \*), длина намагничивающей катушки равна 40 см и в канале катушки можно получить магнитное поле напряженностью 200—250 эрстед. Вследствие четности магнитострикционного эффекта при изменении направления магнитного поля в катушке знак эффекта не меняется.

Опыт можно поставить с проволокой, обладающей положительной магнитострикцией. В этом случае проволока удлинится при намагничивании и пружина, оттягивающая ее, будет соответственно сжиматься. Во всем остальном опыт будет протекать подобно опыту с никелевой проволокой.

*Практические указания.* 1) Для получения возможно большего относительного уменьшения длины никелевой проволоки рекомендуется ее отжечь в атмосфере водорода при температуре 800—900° С в течение 2—3 часов. При невозможности дать никелевой проволоке такого режима отжига в препараторской физического кабинета допустимо ограничиться пропусканием через нее сильного электрического тока в течение нескольких минут, нагревающего проволоку до красного каления. В обоих случаях проволоку перед отжигом необходимо выпрямить, хотя бы сильным вытягиванием ее.

2) Все детали прибора, включая сюда оттягивающую пружину  $D$ , желательно изготовить из неферромагнитного материала.

\*) Рассматриваемый здесь демонстрационный прибор сконструирован инж. Гоголевским К. А.

3) При изменении длины проволоки вследствие ее намагничивания стержень *B*, как мы уже отмечали, передвигается вверх или вниз, заставляя тем самым катиться цилиндрический стерженек, несущий зеркало, по торцевой поверхности держателя *C* (см. рис. 139). Такой способ регистрации магнитострикции удобен тем, что трение, возникающее между передвигаемыми относительно друг друга деталями прибора, значительно снижается. Для устранения скоса в положении цилиндрического стерженя *ка* при движении между плоскостями или даже выпадения его оттуда в описываемом приборе предусмотрено следующее: цилиндрический стержень, несущий зеркало, изготовлен из железа; стержень *C* изготавливается из высокоокоярцитивного сплава с хорошо отполированными поверхностями и намагничивается вдоль своей длины \*). В этом случае цилиндрический стержень будет прочно прижиматься к торцевой поверхности стержня *C* и не будет выпадать или скользить при своем движении. Что же касается сил трения, то последние весьма мало возрастают, если качение цилиндрика будет происходить в однородно намагниченной части конца магнита *C*. Катящийся цилиндрик должен иметь геометрически строго правильную форму. Внешнее магнитное поле от намагниченного стержня *C* будет несколько подмагничивать никелевую проволоку. Однако это обстоятельство мало исказит демонстрируемый эффект.

4) Прибор снабжен винтом *M* для регулировки начальной степени натяжения ферромагнитной проволоки (см. рис. 139).

**Магнитострикционный генератор звуковых и ультразвуковых колебаний.** При включении в намагничающую катушку переменного тока ферромагнитный стержень периодически изменяет свою длину с частотой, в два раза большей, чем частота подведенного к катушке переменного тока (см. предыдущую демонстрацию). Амплитуда этих продольных механических колебаний ферромагнит-

\*) См. выпуск 3 «Лекционных демонстраций по физике», главу IX («Опыты с постоянными магнитами из новых высокоярцитивных сплавов»).

нога стержня будет тогда максимальной, когда частота вынужденных колебаний струнгирующего стержня совпадет с его собственной частотой. Иными словами, первый максимум амплитуды при вибрациях никелевого стержня под действием переменного магнитного поля возникает тогда, когда вдоль длины стержня уложится половина упругой волны,  $\frac{l}{2}$ .

Произведем примерный расчет собственной частоты никелевого стержня длиной  $l = 40 \text{ см}$ , учитывая, что скорость распространения звука в никеле  $v \approx 4,76 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$ :

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l} = \frac{4,76 \cdot 10^5}{2 \cdot 40} \approx 6000 \text{ гц.}$$

Следовательно, для получения максимальных вибраций никелевого стержня длиной 40 см необходимо к обмотке намагничивающей катушки подвести переменное напряжение частотой 3000 гц. Сила этого переменного тока должна быть настолько большой, чтобы вызвать в канале катушки достаточно сильное магнитное поле.

Если намагничивать никелевый стержень переменными полями частоты в два-три раза более высокой, чем рассчитанная по приведенной формуле, то в стержне устанавливаются две, три и более полуволны, т. е. стержень будет возвращаться на одной из своих гармоник.

Обычно в практике магнитострикционные вибраторы возвращаются переменным током на основной волне стержня. Для получения от магнитострикционного генератора колебаний более высоких частот, лежащих в ультразвуковом диапазоне, размеры струнгирующих стержней соответственно уменьшаются. В технике в настоящее время разработано много типов магнитострикционных вибраторов, излучающих ультразвук как в одном определенном направлении, так и равномерно по всем направлениям.

Перейдем теперь к рассмотрению опыта получения магнитострикционных колебаний в аудитории.

Для простоты демонстрации мы рекомендуем взять относительно длинный стержень (примерно 40 см) — в этом случае вибрация стержня будет давать в воздухе

звуковые волны еще в пределах слышимого диапазона. Появление звука, его усиление или ослабление будет служить для нас индикатором магнитострикционных колебаний.

Для демонстрации магнитострикционных колебаний никелевого стержня собирают схему, изображенную на рис. 140. Звуковой генератор З. Г. (до 20 000 гц) соединяется с усилителем низкой частоты, например с усилителем типа У-50. Напряжение от усилителя (100—120 в) подается на концы обмотки намагничивающей катушки А.



Рис. 140.

В канал намагничивающей катушки вводится никелевый или пермаллойный стержень длиной 30—40 мм и диаметром 3—4 мм. Можно взять тонкую полосу той же длины и сечения 2 мм × 10 мм. Лучше всего изготовить для этого опыта трубку (см. ниже).

При плавном изменении частоты переменного тока, получаемого от звукового генератора, ферромагнитный стержень начнет колебаться, причем его колебания будут сопровождаться звуком, частота которого равна удвоенной частоте генератора. Если стержень одинакового сечения по всей длине, хорошо отожжен и обладает малой коэрцитивной силой, то возбуждение его будет происходить при строго определенной частоте. Небольшое изменение частоты звукового генератора в ту или иную сторону вызывает резкое уменьшение силы звука, издаваемого стержнем.

Можно повторить опыт, введя в канал катушки стержень другой длины; его возбуждение произойдет при другой частоте. Рекомендуется показать такой опыт: добившись резкого звучания ферромагнитного стержня, мы вынимаем стержень из катушки и обращаем внимание аудитории на исчезновение звука. Вводя в канал катушки латунный или медный стержень тех же размеров, что и

первоначально взятый ферромагнитный стержень, демонстрируем, что в этом случае звучания не будет.

Если при резонансных колебаниях никелевого или пермаллойного стержня произвести его подмагничивание до насыщения постоянным полем, поднося к нему сильный постоянный магнит или пропуская постоянный ток по добавочной обмотке, нанесенной на катушке  $A$  (рис. 140), то явление резонанса, рассчитанного по приведенной формуле, исчезнет. В этом случае резонанс ферромагнитного стержня наступит при совпадении собственной частоты стержня с частотой переменного тока, возбуждающего катушку. (Ср. с опытом, рассмотренным на стр. 229.)

Опыт хорошо получается с трубкой. Трубка для этой цели изготавливается из тонкого листового никеля. Шов трубки не следует пропаивать по всей длине, достаточно ограничиться двумя-тремя местами крепления. В этом случае трубка будет в меньшей степени прогреваться токами Фуко, развивающимися в металле при его перемагничивании. К трубке можно припаять с одной или с двух концов небольшие диски. В этом случае звучащие трубки более интенсивны.

Если в намагничающую катушку вводится сплошной стержень (или полоска), то, продержав его в катушке в течение нескольких минут, мы обнаружим, что он значительно нагрелся (см. демонстрацию «Нагревание ферромагнетика при циклическом перемагничивании» в «Лекционных демонстрациях по физике», выпуск 3).

Намагничающая катушка  $A$  должна быть той же длины, что и магнитострикционный стержень, либо же на 1—2 см короче стержня. Напряженность переменного магнитного поля в канале катушки следует довести до 100—150 эрстед.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Фриш С. Э. и Тиморева А. В., Курс общей физики, т. 1, Гостехиздат, 1949.
  2. Курс физики под редакцией Папалеся Н. Д., глава «Колебания и волны», написанная проф. С. Н. Ржевкиным. Гостехиздат, 1949.
  3. Баркгауз Г., Введение в учение о колебаниях, Энергогиздат, 1934.
  4. Поль Р. В., Введение в механику и акустику, ГТТИ, 1933.
  5. Серебряников М. Г., Колебания и вибрации в элементарном изложении, Гостехиздат, 1940.
  6. Лукьянов Н. С., Физический кабинет средних учебных заведений, Полтава, 1906.
  7. Галанин Д. Д., Горячкин Е. Н., Жарков С. Н. и Сахаров Д. И., Физический эксперимент в школе, том VI, раздел «Акустика», написанный Д. И. Сахаровым, Учпедгиз, 1941.
-

Цена 3 р. 35 к.