

§ 6. Звуковые волны

Звуковые волны (звук) окружают человека с первых дней его жизни. Звуки позволяют людям общаться между собой, выражать эмоции, наслаждаться музыкальными шедеврами. Как это происходит? Каковы основные свойства звуковых волн?

Упругие волны, вызывающие у человека слуховые ощущения, называются **звуковыми волнами** или просто **звуком**. Человеческое ухо воспринимает в виде звуковых ощущений колебания от 16 до 20 000 Гц.

Раздел физики, в котором изучаются звуковые явления, называется **акустикой**.

Звуковые волны классифицируются по **частоте** следующим образом (рис. 41):

инфразвук ($\nu < 16$ Гц); слышимый человеком звук ($16 \text{ Гц} < \nu < 2,0 \cdot 10^4$ Гц); ультразвук ($2,0 \cdot 10^4 \text{ Гц} < \nu < 1,0 \cdot 10^9$ Гц); гиперзвук ($10^9 \text{ Гц} < \nu < 10^{12} \text{ Гц} \div 10^{13} \text{ Гц}$).

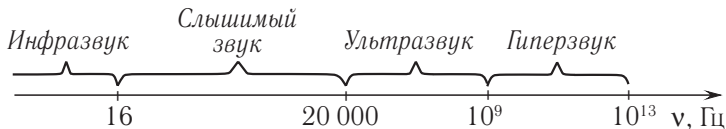


Рис. 41. Шкала звуковых волн

Звуки (звуковые волны) приносят человеку жизненно важную информацию — с их помощью мы общаемся, наслаждаемся музыкой, узнаем по голосу знакомых людей. Мир окружающих нас звуков разнообразен и сложен, однако мы достаточно легко ориентируемся в нем и можем безошибочно отличить пение птиц от шума городской улицы.

Что представляет собой звук и каким образом он возникает?

Рассмотрим в качестве источника звука барабан (рис. 42). Деформированная в результате удара мембрана барабана будет совершать колебания с некоторой частотой. В результате этого мембрана создает попеременно сжатие и разрежение в прилегающей к ней области воздуха, и образуется *продольная волна*, которая распространяется в воздухе с течением времени.

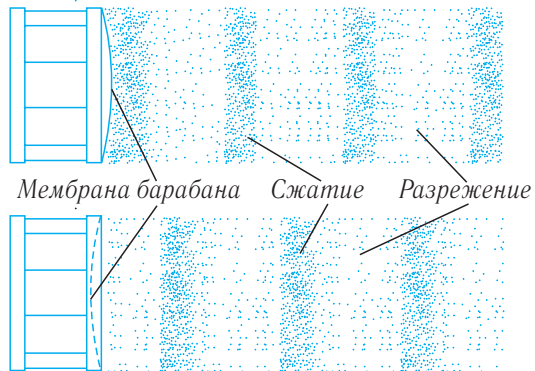


Рис. 42. Образование звуковой волны, создаваемой мембраной барабана

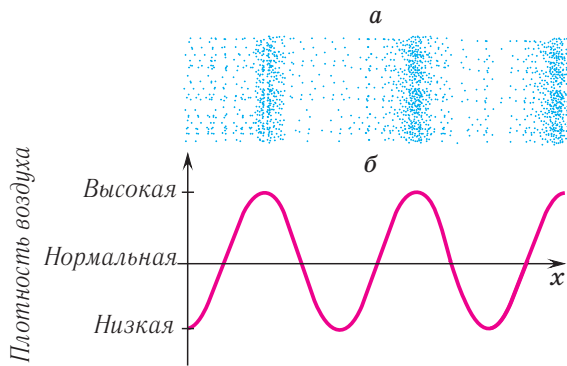


Рис. 43. Зависимость плотности воздуха от координаты в продольной волне

Наглядную информацию о звуковой волне в некоторый момент времени дает график зависимости плотности воздуха от координаты (рис. 43). Горбы на этом графике соответствуют сжатию, а впадины — разрежению воздуха. В процессе распространения звуковой волны с течением времени изменяются такие характеристики среды, как плотность и давление (см. рис. 43).

Для распространения звуковых волн необходима среда с упругими свойствами. Они хорошо распространяются в упругих средах, таких как газ, жидкость, металлы, стекло, кристаллические материалы. Однако звуковые волны быстро затухают в пористых материалах (поролон, войлок, вата). Такие материалы используют для звукоизоляции. Лучшим изолятором звука является вакуум (пустота), так как результаты экспериментов показывают, что звуковые волны в пустоте (вакууме) не распространяются.

Основными *физическими* характеристиками звука являются *интенсивность* и *спектральный состав (спектр)*.

Понятие **интенсивность звука** характеризует энергию, переносимую звуковой волной.



Интенсивность звука, улавливаемого ухом человека, лежит в огромных пределах: от $\sim 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*порог слышимости*) до $\sim 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*порог болевого ощущения*). Человек может слышать и более интенсивные звуки, но при этом он будет испытывать боль. Звуки еще большей интенсивности могут привести к травме.

Минимальная интенсивность, при которой ухо человека перестает воспринимать звук, называется **порогом слышимости**. Наиболее чувствительно наше ухо к волнам частотой примерно 3 кГц, так как при этой частоте интенсивности порядка $10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ уже достаточно, чтобы ухо восприняло звук. А для того чтобы услышать звук на частоте 50 Гц, его интенсивность должна быть примерно в 100 000 раз больше, т. е. быть



порядка $10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.

Таким образом, для возникновения звуковых ощущений необходимо:

- наличие источника звука;
- наличие упругой среды между источником звука и ухом. При этом частота колебаний источника звука должна находиться в пределах 16—20 000 Гц;
- мощность звуковых волн должна быть достаточной для того, чтобы вызвать ощущение звука.

Еще одной основной характеристикой звука является его *спектр*. **Спектром** называется набор частот звуков различных колебаний, образующих данный звуковой сигнал. Спектр может быть *сплошным* или *дискретным*.

Сплошной спектр означает, что в данном наборе присутствуют волны, частоты которых заполняют весь заданный спектральный диапазон.

Дискретный спектр означает наличие конечного числа волн с определенными частотами и амплитудами, которые образуют рассматриваемый сигнал.

По типу спектра звуки разделяются на музыкальные тона и шумы.

Музыкальный тон создается периодическими колебаниями звучащего тела (камертон, струна) и представляет собой гармоническое колебание одной частоты. Спектр гармонического колебания представляет собой одну вертикальную линию (рис. 44).

Шум — совокупность множества разнообразных кратковременных звуков (хруст, шелест, шорох, стук и т. п.) — представляет собой наложение большого числа колебаний с близкими амплитудами, но различными частотами (имеет сплошной спектр) (рис. 45).

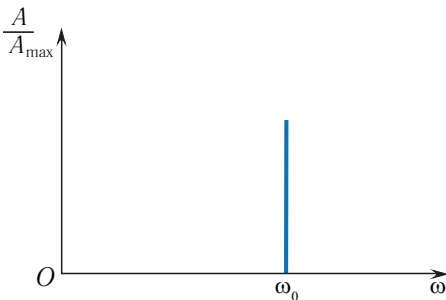


Рис. 44. Спектрограмма гармонического колебания

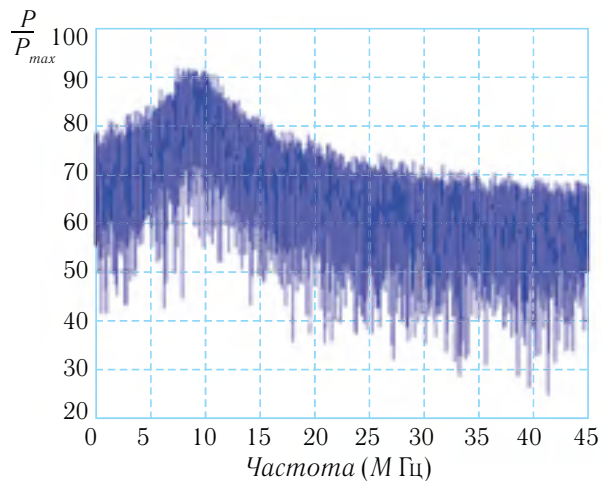


Рис. 45. Спектр шума



Нота	Частота, Гц
До	261,62
До-диез	277,18
Ре	293,67
Ми-бемоль	311,13
Ми	329,63
Фа	349,23
Фа-диез	369,99
Си	392,00
Си-диез	415,30
Ля	440,00
Соль-бемоль	466,16
Соль	493,88
До	523,25

Рис. 46. Камертоны с частотами колебаний звуков первой октавы

Физическим характеристикам звука соответствуют его *субъективные* характеристики, связанные с его восприятием ухом человека. Это обусловлено тем, что восприятие звука — процесс не только физический, но и физиологический. Человеческое ухо воспринимает звуковые колебания определенных частот и интенсивностей по-разному, в зависимости от чувствительности органов слуха.

Основными **физиологическими** характеристиками звука являются *громкость, высота и тембр*.

Громкость (степень слышимости звука) определяется как интенсивностью звука (амплитудой колебаний в звуковой волне), так и различной чувствительностью человеческого уха на разных частотах. Наибольшей чувствительностью человеческое ухо обладает в диапазоне частот от 1000 до 5000 Гц.

Высота звука определяется частотой звуковых колебаний, обладающих наибольшей интенсивностью в спектре.

Для музыкального звука (созвучия) основной тон соответствует наименьшей частоте (рис. 46). Все *остальные тоны* называют *обертонами*. **Тембр** (оттенок звука) зависит от того, сколько обертонов присоединяются к *основному тону* и какова их интенсивность и частота.

По тембру мы легко отличаем звуки скрипки и рояля, органа и флейты, голоса людей (табл. 3) и т. д.

Таблица 3. Частота ν колебаний различных источников звука

Источник звука	ν , Гц	Источник звука	ν , Гц
<i>Мужской голос:</i>	80—500	Орган	22—16 000
бас	80—350	Флейта	260—15 000
баритон	100—400	Скрипка	260—15 000
тенор	130—500	Арфа	30—15 000
<i>Женский голос:</i>	170—1400	Барабан	90—14 000
контральто	170—780	Контрабас	60—8000
меццо-сопрано	200—1000	Виолончель	70—8000
сопрано	250—1300	Труба	60—6000
колоратурное	260—1400	Саксофон	80—8000
сопрано		Рояль	90—9000

Скорость звука зависит от упругих свойств, плотности и температуры среды. Чем больше упругие силы, тем быстрее передаются колебания частиц соседним частицам и тем быстрее распространяется волна. Поэтому скорость звука в газах меньше, чем в жидкостях, а в жидкостях, как правило, меньше, чем в твердых телах (табл. 4).

Таблица 4. Скорость звука в различных средах

Среда	t , °C	v , $\frac{м}{с}$
Воздух	0	331
Воздух	20	343
Вода	20	1490
Глицерин	20	1920
Ртуть	20	1450
Лед	0	3280
Сталь	20	5050
Стекло	20	5300
Чугун	20	3850

Скорость звука в идеальных газах с ростом температуры растет пропорционально \sqrt{T} , где T — абсолютная температура. В воздухе скорость

звука $v = 331 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ при температуре $t = 0 \text{ }^\circ\text{С}$ и $v = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$. В жидкостях и металлах скорость звука, как правило, уменьшается с ростом температуры (исключение — вода).

► На основе музыкальных тонов создана музыкальная азбука — ноты (до, ре, ми, фа, соль, ля, си), которые позволяют воспроизводить одну и ту же мелодию на различных музыкальных инструментах.

Интервал частот музыкальных звуков, на границах которого звуки по частоте отличаются в 2 раза, называют октавой (см. рис. 46).

Музыкальный звук (созвучие) — результат наложения нескольких одновременно звучащих музыкальных тонов. Основной тон называется также первой гармоникой. Обертоны называются гармоническими, если частоты обертонов кратны частоте основного тона. Таким образом, музыкальный звук имеет дискретный спектр (рис. 47).

Многие животные могут воспринимать звуки ультразвуковых частот. Например, собаки могут слышать звуки до 50 000 Гц, а летучие мыши — до 100 000 Гц. Инфразвук, распространяясь в воде на сотни километров, помогает китам и многим другим морским животным ориентироваться в толще воды.

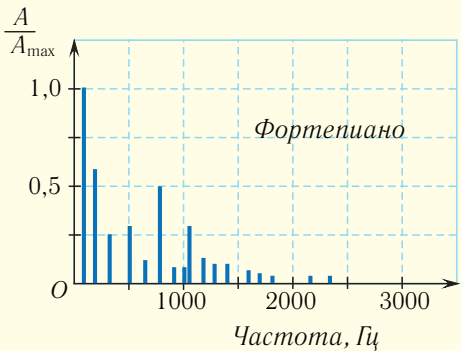
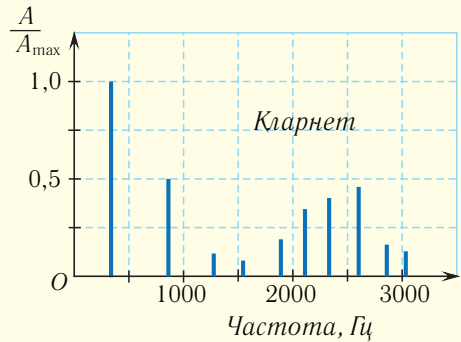


Рис. 47. Спектрограммы двух музыкальных инструментов для одинаковых мелодий



1. Какова природа звука и каковы его источники?
2. Как классифицируются звуки?
3. Какой диапазон звуковых частот воспринимает ухо человека?
4. Чему равна скорость распространения звука в воздухе?
5. Как зависит высота звука от частоты?
6. В каких пределах находятся частоты инфразвуковых и ультразвуковых волн?

7. Полет каких птиц и насекомых мы слышим, а каких нет? Используя данные таблицы 5, определите, у какого насекомого самый высокий звук.

8. Как по звукам, издаваемым мухой и комаром, определить, кто из них в полете чаще машет крыльями?

9. Почему бабочки летают бесшумно?

10. Назовите основные физические и физиологические характеристики звука.

11. Что такое порог слышимости? Болевой порог?

12. На какой частоте человеческое ухо обладает наилучшей чувствительностью?

Таблица 5. Частота колебаний крыльев насекомых и птиц в полете, Гц

Аист	2
Ворона	3—4
Бабочка	до 9
Воробей	до 13
Стрекоза	38—100
Оса	100—110
Шмель	180—240
Муха (комнатная)	190—330
Пчела (с ношей)	200—250
Комар	300—600



Пример решения задачи

Стальные детали проверяются ультразвуковым дефектоскопом (рис. 48). Определите толщину d детали и глубину h расположения дефекта, если после излучения ультразвукового сигнала получены два отраженных сигнала через промежутки времени $\tau_1 = 0,15$ мс и $\tau_2 = 0,10$ мс. Модуль скорости распространения ультразвука в детали $v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

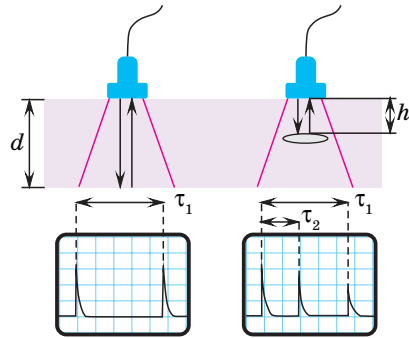


Рис. 48

Дано:

$$\tau_1 = 0,15 \text{ мс} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$\tau_2 = 0,10 \text{ мс} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

$$v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$d = ?$ $h = ?$

Решение

Первый отраженный сигнал прошел путь от источника ультразвука до стенки детали и обратно, равный $2d$.

Следовательно, толщина детали:

$$d = \frac{v\tau_1}{2}, \quad d = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,39 \text{ м.}$$

Глубину нахождения дефекта находим аналогично:

$$h = \frac{v\tau_2}{2}, \quad h = \frac{5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ с}}{2} = 0,26 \text{ м.}$$

Ответ: $d = 0,39 \text{ м}$, $h = 0,26 \text{ м}$.

Упражнение 6

1. Расстояние между двумя железнодорожными станциями $l = 10 \text{ км}$. Сколько времени распространяется звук от одной станции к другой по воздуху (Δt_1) и по стальным рельсам (Δt_2)? Температура воздуха $t = 0,0 \text{ }^\circ\text{С}$.
2. Дельфины испускают ультразвуковые импульсы частотой $\nu = 250 \text{ кГц}$. Определите длину волны такого ультразвука в воде (λ_1) и в воздухе (λ_2) при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$.
3. Определите расстояние l до преграды, если мальчик слышит эхо через промежуток времени $\tau = 2,0 \text{ с}$. Скорость звука в воздухе $v = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
4. Определите глубину моря H в данном месте, если ультразвуковой импульс возвратился на судно через промежуток времени $\Delta t = 0,20 \text{ с}$ после послышки. Модуль скорости ультразвука в морской воде $v = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
5. Турист подошел к горному озеру. Он крикнул и услышал звук эха, отраженного от скалы, находящейся на противоположном берегу. Определите расстояние l до противоположного берега озера, если турист услышал эхо через промежуток времени $\tau = 1,5 \text{ с}$.
6. Мальчик видит, как тяжелый камень упал на бетонный тротуар. Некоторое время спустя он слышит два звука от удара камня: один пришел по бетону, а другой распространялся по воздуху. Промежуток времени между ними $\Delta t = 1,2 \text{ с}$. На каком расстоянии l от человека упал камень, если модуль скорости звука в бетоне $v_б = 4500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?
7. Стальную деталь проверяют ультразвуковым дефектоскопом. Определите глубину h нахождения дефекта в детали и ее толщину d , если первый отраженный сигнал получен через промежуток времени $\tau_1 = 8,0 \text{ мкс}$, а второй — через $\tau_2 = 20 \text{ мкс}$. Определите толщину детали, если скорость звука в стали составляет $v = 5,0 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



САМОЕ ВАЖНОЕ В ГЛАВЕ 1

Периодическим называется движение, при котором характеризующие его физические величины через равные промежутки времени принимают одинаковые значения.

Уравнение гармонических колебаний:

$$a_x(t) + \omega^2 x(t) = 0.$$

Колебательным называется движение (процесс), при котором любая характеризующая это движение (процесс) физическая величина поочередно изменяется то в одну, то в другую сторону от ее значения в положении устойчивого равновесия.

Колебания, при которых зависимость координаты (смещения) тела от времени определяется соотношениями

$$x(t) = x_{\max} \cos(\omega t + \varphi_0) \text{ или } x(t) = x_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0),$$

называются **гармоническими**, а система, совершающая такие колебания, — **гармонической колебательной системой**. Зависимость координаты тела от времени $x(t)$ называется **кинематическим законом движения**.

Колебания тела являются **гармоническими**, если они происходят под действием возвращающей силы, проекция которой прямо пропорциональна смещению тела из положения равновесия и направленной к положению равновесия колеблющегося тела, т. е. $F_x = -kx$.

Амплитуда колебаний A ($A > 0$) — максимальное смещение x_{\max} тела или системы тел из положения равновесия.

Период колебания T — время одного колебания:

$$T = \frac{\Delta t}{N}.$$

Частота колебаний ν — число колебаний, совершаемых в единицу времени:

$$\nu = \frac{N}{\Delta t} = \frac{1}{T}.$$

Циклическая частота ω — число колебаний за промежуток времени $\Delta t = 2\pi$ секунд:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$



Колебательная система, состоящая из тела массой m и невесомой пружины жесткостью k , соединяющей тело и опору, называется **пружинным маятником**. Его период колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

Математическим маятником называется тело массой m , подвешенное на невесомой нерастяжимой нити длиной l , находящееся в поле силы тяжести. Период малых колебаний математического маятника определяется по **формуле Гюйгенса**:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Собственные (свободные) колебания — это колебания, происходящие в отсутствие внешних воздействий на систему. При отсутствии трения они происходят со строго определенной частотой, называемой **частотой собственных колебаний** системы.

Затухающими называются колебания, энергия которых уменьшается с течением времени.

Вынужденными называются колебания системы, вызываемые действием на нее периодических внешних сил.

Резонанс — это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты ω , действующей на колебательную систему внешней силы, к собственной частоте ω_0 системы ($\omega \rightarrow \omega_0$).

Механической волной называется процесс распространения колебаний в упругой среде, который сопровождается передачей энергии от одной точки среды к другой.

Длина волны — расстояние, пройденное волной в среде за промежуток времени, равный периоду колебаний частиц:

$$\lambda = vT.$$

Скорость распространения волны — это скорость распространения колебаний в упругой среде. Модуль скорости распространения волны:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu.$$



Волна называется **продольной**, если колебания частиц среды происходят вдоль направления распространения волн.

Волна называется **поперечной**, если частицы среды колеблются в плоскости, перпендикулярной к направлению распространения волны.

Упругие волны, вызывающие у человека слуховые ощущения, называются **звуковыми волнами** или просто **звуком**.

Основными **физическими** характеристиками звука являются *интенсивность* и *спектральный состав (спектр)*. Основными **физиологическими** характеристиками звука являются *громкость, высота и тембр*.

Единицы основных величин механических колебаний и волн

Наименование	Обозначение	Единица	Выражение через основные единицы в СИ
Частота	ν	Герц (Гц)	с^{-1}
Период	T	Секунда (с)	с
Циклическая (круговая) частота	ω	РадIAN в секунду $\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$	с^{-1}
Амплитуда	A	Метр (м)	м
Длина волны	λ	Метр (м)	м
Модуль скорости волны	v	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$

Задания для самостоятельных исследований

1. Подготовьте интерактивную презентацию (флаер, плакат, реферат) о деятельности выдающихся физиков (Г. Галилей, Х. Гюйгенс).

2. Подготовьте интерактивные презентации на темы: «Применение ультразвуковых волн в медицине, технике, бытовых приборах», «Шум и его воздействие на человека», «Инфразвук — применение и борьба с ним».

3. Если наблюдать за уткой, плывущей в пруду (рис. 49, а), или с высоты за катером, плывущим по поверхности озера (рис. 49, б), то

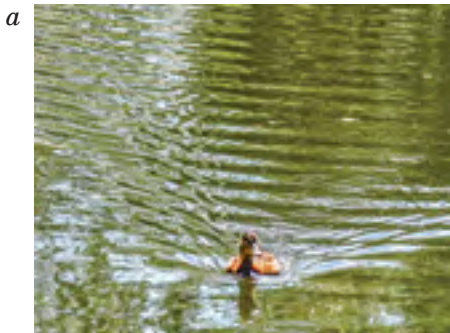


Рис. 49



Рис. 50



Рис. 51

можно заметить волны, расходящиеся под некоторым углом к направлению движения утки (катера). Объясните это явление и определите, как зависит угол расхождения волн на воде от скорости утки (катера).

4. Частично наполните водой бокал, смочите водой палец и аккуратно водите им по краю бокала (рис. 50). Через некоторое время бокал начнет звенеть. Меняя уровень воды в бокале, можно добиться изменения высоты звука. Объясните данное явление и подберите уровни воды так, чтобы звучание бокала соответствовало музыкальным нотам. Можно ли сыграть на таких бокалах простейшую мелодию?

5. Если соединить доньшки двух пластиковых стаканов (или консервных банок) натянутой нитью (рис. 51), то образуется так называемый «струнный телефон». Изучите зависимость интенсивности звука в «струнном телефоне» от длины нити и силы ее натяжения.

