

§ 6. Гукавыя хвалі

■ Гукавыя хвалі (гук) акружаюць чалавека з першых дзён яго жыцця. Гукі дазваляюць людзям мець зносіны паміж сабой, выказаць эмоцыі, атрымліваць асалоду ад музычных шэдэўраў. Як гэта адбываецца? Якія асноўныя ўласцівасці гукавых хваль?

Пругкія хвалі, якія выклікаюць у чалавека гукавыя адчуванні, называюцца **гукавымі хвалямі** або проста **гукам**. Чалавечае вуха ўспрымае ў выглядзе гукавых адчуванняў ваганні ад 16 да 20 000 Гц.

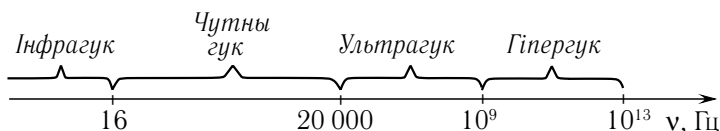
Раздзел фізікі, у якім вывучаюцца гукавыя з'явы, называецца **акустыкай**.

Гукавыя хвалі класіфікуюцца па частаце наступным чынам (мал. 41): інфрагук ($v < 16$ Гц);

чутны чалавекам гук ($16 \text{ Гц} < v < 2,0 \cdot 10^4$ Гц);

ультрагук ($2,0 \cdot 10^4 \text{ Гц} < v < 1,0 \cdot 10^9$ Гц);

гіпергук ($10^9 \text{ Гц} < v < 10^{12} \text{ Гц} \div 10^{13} \text{ Гц}$).

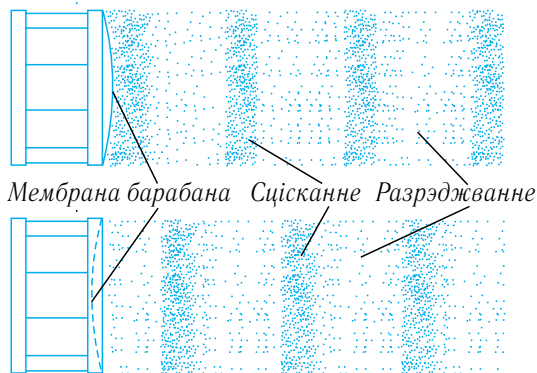


Мал. 41. Шкала гукавых хваль

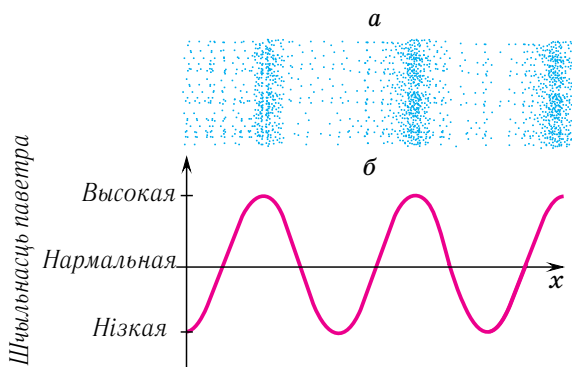
Гукі (гукавыя хвалі) прыносяць чалавеку жыццёва важную інфармацыю — з іх дапамогай мы маем зносіны, атрымліваем асалоду ад музыкі, пазнаём па голасе знаёмых людзей. Свет гукаў вакол нас разнастайны і складаны, аднак мы досыць лёгка арыентуемся ў ім і можам беспамылкова адрозніць спеў птушак ад шуму гарадской вуліцы.

Што ўяўляе сабой гук і якім чынам ён узнікае?

Разгледзім у якасці крыніцы гуку барабан (мал. 42). Дэфармаваная ў выніку ўдару мембрана барабана будзе выконваць ваганні з некаторай частатой. У выніку гэтага мембрана стварае папераменна сцісканне і разрэджванне ў прылеглай да яе вобласці паветра, і ўтвараецца *падоўжная хваля*, якая распаўсюджваецца ў паветры з цягам часу.



Мал. 42. Утварэнне гукавой хвалі, ствараемай мембранай барабана



Мал. 43. Залежнасць шчыльнасці паветра ад каардынаты ў падоўжнай хвалі

Наглядную інфармацыю аб гукавой хвалі ў некаторы момант часу дае графік залежнасці шчыльнасці паветра ад каардынаты (мал. 43). Гарбы на гэтым графіку адпавядаюць сцісканню, а ўпадзіны — разрэджванню паветра. У працэсе распаўсюджвання гукавой хвалі з цягам часу змяняюцца такія характарыстыкі асяроддзя, як шчыльнасць і ціск (гл. мал. 43).

Для распаўсюджвання гукавых хваль неабходна асяроддзе з пругкімі ўласцівасцямі. Яны добра распаўсюджваюцца ў пругкіх асяроддзях, такіх як газ, вадкасць, металы, шкло, крышталічныя матэрыялы. Аднак гукавыя хвалі хутка затухаюць у порыстых матэрыялах (паралон, лямец, вата). Такія матэрыялы выкарыстоўваюць для гукаізаляцыі. Найлепшым ізалятарам гуку з’яўляецца вакуум (пустата), паколькі вынікі эксперыменту паказваюць, што гукавыя хвалі ў пустаце (вакууме) не распаўсюджваюцца.

Асноўнымі *фізічнымі* характарыстыкамі гуку з’яўляюцца *інтэнсіўнасць і спектральны састаў (спектр)*.



Паняцце **інтэнсіўнасць гуку** характарызуе энергію, якую пераносіць гукавая хваля.

Інтэнсіўнасць гуку, які ўспрымаецца вухам чалавека, змяняецца ў шырокіх межах: ад $\sim 10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*парог чутнасці*) да $\sim 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ (*парог болевага адчування*). Чалавек можа чуць і больш інтэнсіўныя гукі, але пры гэтым ён будзе адчуваць боль. Гукі яшчэ большай інтэнсіўнасці могуць прывесці да траўмы.

Мінімальная інтэнсіўнасць, пры якой вуха чалавека перастае ўспрымаць гук, называецца **парогам чутнасці**. Найбольш адчувальнае наша вуха да хваль частотой прыкладна 3 кГц, паколькі пры гэтай частаце інтэнсіўнасці каля $10^{-12} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ужо дастаткова, каб вуха ўспрыняла гук.

А для таго каб пачуць гук на частаце 50 Гц, яго інтэнсіўнасць павінна быць прыкладна ў 100 000 разоў большай, г. зн. каля $10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$.



Такім чынам, для ўзнікнення гукавых адчуванняў неабходна:

- наяўнасць крыніцы гуку;
- наяўнасць пружкага асяроддзя паміж крыніцай гуку і вухам. Пры гэтым частата ваганняў крыніцы гуку павінна знаходзіцца ў межах 16—20 000 Гц;
- магутнасць гукавых хваль павінна быць дастатковай для таго, каб выклікаць адчуванне гуку.

Яшчэ адной асноўнай характарыстыкай гуку з'яўляецца яго *спектр*. **Спектрам** называецца набор частот гукавых ваганняў, якія ўтвараюць дадзены гукавы сігнал. Спектр можа быць *суцэльным* або *дыскрэтным*.

Суцэльны спектр азначае, што ў дадзеным наборы прысутнічаюць хвалі, частоты якіх запаўняюць увесь зададзены спектральны дыяпазон.

Дыскрэтны спектр азначае наяўнасць канчатковага ліку хваль з пэўнымі частотамі і амплітудамі, якія ўтвараюць разглядаемы сігнал.

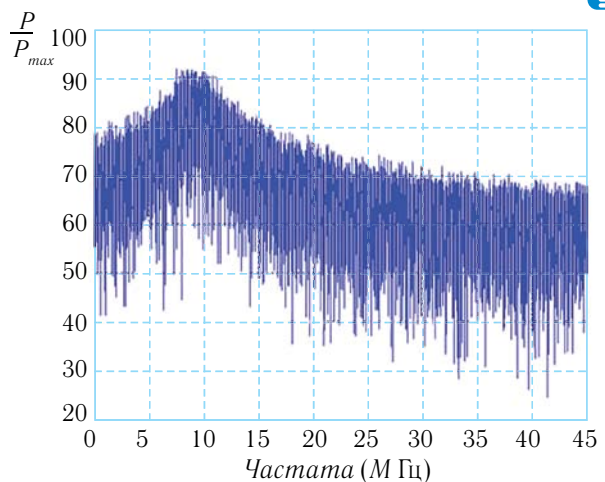
Па тыпу спектра гукі падзяляюцца на музычныя тоны і шумы.

Музычны тон ствараецца перыядычнымі ваганнямі цела, якое гучыць (камертон, струна), і ўяўляе сабой гарманічнае ваганне адной частаты. Спектр гарманічнага вагання ўяўляе сабой адну вертыкальную лінію (мал. 44).

Шум — сукупнасць мноства разнастайных кароткачасовых гукаў (хрускенне, шолах, шоргат, грук і да т. п.) — уяўляе сабой накладанне вялікага ліку ваганняў з блізкімі амплітудамі, але рознымі частотамі (мае суцэльны спектр) (мал. 45).



Мал. 44. Спектраграма гарманічнага вагання



Мал. 45. Спектр шуму



Nota	Частата, Гц
До	261,62
До-дыез	277,18
Рэ	293,67
Мі-бемоль	311,13
Мі	329,63
Фа	349,23
Фа-дыез	369,99
Сі	392,00
Сі-дыез	415,30
Ля	440,00
Соль-бемоль	466,16
Соль	493,88
До	523,25

Мал. 46. Камертоны з частатамі ваганняў гукаў першай актавы

Фізічным характарыстыкам гуку адпавядаюць яго *суб'ектыўныя* характарыстыкі, звязаныя з яго ўспрыманням вухам чалавека. Гэта абумоўлена тым, што ўспрыманне гуку — працэс не толькі фізічны, але і фізіялагічны. Вуха чалавека ўспрымае гукавыя ваганні пэўных частот і інтэнсіўнасцей па-рознаму, у залежнасці ад адчувальнасці органаў слыху.

Асноўнымі **фізіялагічнымі** характарыстыкамі гуку з'яўляюцца *гучнасць, вышыня і тэмбр*.

Гучнасць (ступень чутнасці гуку) вызначаецца як інтэнсіўнасцю гуку (амплітудай ваганняў у гукавой хвалі), так і рознай адчувальнасцю вуха чалавека на розных частотах. Найбольшую адчувальнасць чалавечэе вуха мае ў дыяпазоне частот ад 1000 да 5000 Гц.

Вышыня гуку вызначаецца частатой гукавых ваганняў, якія маюць найбольшую інтэнсіўнасць у спектры.

Для музычнага гуку (сугучнасці) асноўны тон адпавядае найменшай частаце (мал. 46). Усе *астатнія тоны* называюць *абертанамі*. **Тэмбр** (адценне гуку) залежыць ад таго, колькі абертонаў далучаецца да *асноўнага тону* і якая іх інтэнсіўнасць і частата.

Па тэмбры мы лёгка адрозніваем гукі скрыпкі і раяля, аргана і флейты, галасы людзей (табл. 3) і г. д.

Табліца 3. Частата ν ваганняў розных крыніц гуку

Крыніца гуку	ν , Гц	Крыніца гуку	ν , Гц
<i>Мужчынскі голас:</i>	80—500	Арган	22—16 000
бас	80—350	Флейта	260—15 000
барытон	100—400	Скрыпка	260—15 000
тэнар	130—500	Арфа	30—15 000
<i>Жаночы голас:</i>	170—1400	Барабан	90—14 000
кантральта	170—780	Кантрабас	60—8000
меца-сапрана	200—1000	Віяланчэль	70—8000
сапрана	250—1300	Труба	60—6000
каларатурнае	260—1400	Саксафон	80—8000
сапрана		Раяль	90—9000

Скорасць гуку залежыць ад пругкіх уласцівасцей, шчыльнасці і тэмпературы асяроддзя. Чым больш пругкія сілы, тым хутчэй перадаюцца ваганні часціц суседнім часціцам і тым хутчэй распаўсюджваецца хваля. Таму скорасць гуку ў газах меншая, чым у вадкасцях, а ў вадкасцях, як правіла, меншая, чым у цвёрдых целах (табл. 4).

Табліца 4. Скорасць гуку ў розных асяроддзях

Асяроддзе	t , °C	v , $\frac{m}{c}$
Паветра	0	331
Паветра	20	343
Вада	20	1490
Гліцэрына	20	1920
Ртуць	20	1450
Лёд	0	3280
Сталь	20	5050
Шкло	20	5300
Чыгун	20	3850

Скорасць гуку ў ідэальных газах з ростам тэмпературы расце прапарцыянальна \sqrt{T} , дзе T — абсалютная тэмпература. У паветры скорасць гуку $v = 331 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ пры тэмпературы $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ і $v = 343 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ пры тэмпературы $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. У вадкасцях і металах скорасць гуку, як правіла, памяншаецца з ростам тэмпературы (выключэнне — вада).

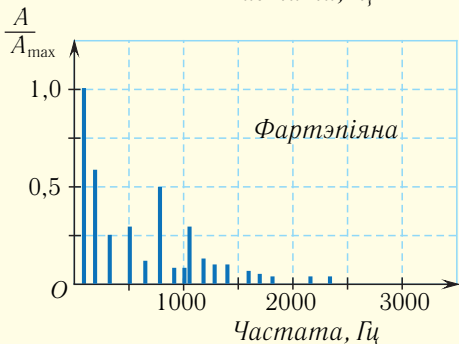
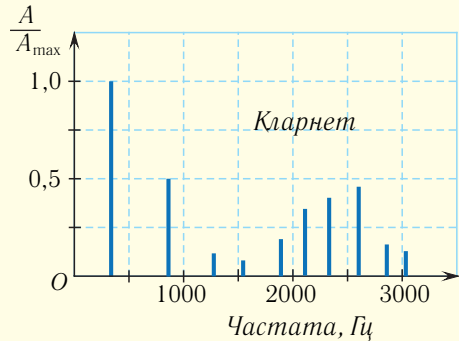
► На аснове музычных тонаў створа на музычная азбука — ноты (до, рэ, мі, фа, соль, ля, сі), якія дазваляюць прайграваць адну і тую ж мелодыю на розных музычных інструментах.

Інтэрвал частот музычных гукаў, на межах якога гукі па частаце адрозніваюцца ў 2 разы, называюць актавай (гл. мал. 46).

Музычны гук (сугучча) — вынік накладання некалькіх музычных тонаў, якія гучаць адначасова. Асноўны тон называецца таксама першай гармонікай. Абертоны называюцца гарманічнымі, калі частоты абертонаў кратны частаце асноўнага тону. Такім чынам, музычны гук мае дыскрэтны спектр (мал. 47).

Многія жывёлы могуць успрымаць гукі ультрагукавых частот. Напрыклад, сабакі могуць чуць гукі да 50 000 Гц, а кажаны — да 100 000 Гц.

Інфрагук, які распаўсюджваецца ў вадзе на сотні кіламетраў, дапамагае кітам і многім іншым марскім жывёлам арыентавацца ў тоўшчы вады.



Мал. 47. Спектраграмы двух музычных інструментаў для аднолькавых мелодый



1. Якая прырода гуку і якія яго крыніцы?
2. Як класіфікуюцца гукі?
3. Які дыяпазон гукавых частот успрымае вуха чалавека?
4. Чаму роўна скорасць распаўсюджвання гуку ў паветры?
5. Як залежыць вышыня гуку ад частаты?
6. У якіх межах знаходзяцца частоты інфрагукавых і ультрагукавых хваль?

7. Палёт якіх птушак і насякомых мы чуем, а якіх — не? Выкарыстаўшы даныя табліцы 5, вызначыце, у якога насякомага самы высокі гук палёту.

8. Як па гуках, выдаваемых мухай і камаром, вызначыць, хто з іх у палёце часцей махае крыламі?

9. Чаму матылькі лётаюць бяшумна?

10. Назавіце асноўныя фізічныя і фізіялагічныя характарыстыкі гучу.

11. Што такое парог чутнасці? Бolestы парог?

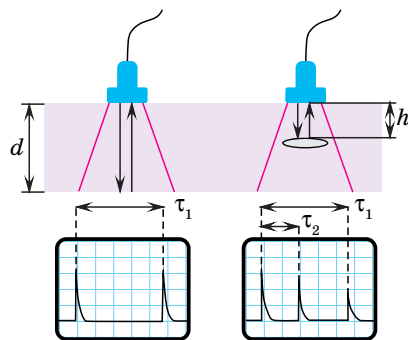
12. На якой частаце вуша чалавека мае найлепшую адчувальнасць?

Табліца 5. Частата ваганняў крылаў насякомых і птушак у палёце, Гц

Бусел	2
Варона	3—4
Матылёк	да 9
Верабей	да 13
Страказа	38—100
Аса	100—110
Чмель	180—240
Муха (пакаёвая)	190—330
Пчала (з ношай)	200—250
Камар	300—600

Прыклад рашэння задачы

Стальныя дэталі правяраюць ультрагукавым дэфектаскопам (мал. 48). Вызначыце таўшчыню d дэталі і глыбіню h размяшчэння дэфекту, калі пасля вылучэння ультрагукавога сігнала атрыманы два адбітыя сігналы праз прамежкі часу $\tau_1 = 0,15$ мс і $\tau_2 = 0,10$ мс. Модуль скорасці распаўсюджвання ультрагуку ў дэталі $v = 5,2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



Мал. 48

Дадзена:

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

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

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

d — ? h — ?

Рашэнне

Першы адбіты сігнал прайшоў шлях ад крыніцы ультрагуку да сценкі дэталі і назад, роўны $2d$.

Такім чынам, таўшчыня дэталі:

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

Глыбіню знаходжання дэфекту знаходзім аналагічна:

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

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

Практыкаванне 6

1. Адлегласць паміж дзвюма чыгуначнымі станцыямі $l = 10 \text{ км}$. Колькі часу распаўсюджваецца гук ад адной станцыі да другой па паветры (Δt_1) і па стальных рэйках (Δt_2)? Тэмпература паветра $t = 0,0 \text{ }^\circ\text{С}$.
2. Дэльфіны выпускаюць ультрагукавыя імпульсы частотой $\nu = 250 \text{ кГц}$. Вызначыце даўжыню хвалі такога ультрагуку ў вадзе (λ_1) і ў паветры (λ_2) пры тэмпературы $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$.
3. Вызначыце адлегласць l да перашкоды, калі хлопчык чуе рэха праз прамежак часу $\tau = 2,0 \text{ с}$. Скорасць гуку ў паветры $v = 340 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
4. Вызначыце глыбіню мора H у дадзеным месцы, калі ультрагукавы імпульс вярнуўся на судна праз прамежак часу $\Delta t = 0,20 \text{ с}$ пасля адпраўкі. Модуль скорасці ультрагуку ў марской вадзе $v = 1,5 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
5. Турыст падышоў да горнага возера. Ён крыкнуў і пачуў гук рэха, адбітага ад скалы на процілеглым беразе. Вызначыце адлегласць l да процілеглага берага возера, калі турыст пачуў рэха праз прамежак часу $\tau = 1,5 \text{ с}$.
6. Хлопчык бачыць, як цяжкі камень упаў на бетонны тратуар. Праз некаторы час ён чуе два гукі ад удару каменя: адзін прыйшоў па бетоне, а другі распаўсюджваўся па паветры. Прамежак часу паміж імі $\Delta t = 1,2 \text{ с}$. На якой адлегласці l ад хлопчыка ўпаў камень, калі модуль скорасці гуку ў бетоне $v_6 = 4500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$?
7. Стальную дэталю правяраюць ультрагукавым дэфектаскопам. Вызначыце глыбіню h знаходжання дэфекту ў дэталі і яе таўшчыню d , калі першы адбіты сігнал атрыманы праз прамежак часу $\tau_1 = 8,0 \text{ мкс}$, а другі — праз $\tau_1 = 20 \text{ мкс}$. Вызначыце таўшчыню дэталі, калі скорасць гуку ў сталі складае $v = 5,0 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



САМАЕ ВАЖНАЕ Ў РАЗДЗЕЛЕ 1

Перыядычным называецца рух, пры якім фізічныя велічыні, што яго характарызуюць, праз роўныя прамежкі часу прымаюць аднолькавыя значэнні.

Вагальным называецца рух (працэс), пры якім любая фізічная велічыня, што характарызуе гэты рух (працэс), па чарзе змяняецца то ў адзін, то ў другі бок ад яе значэння ў становішчы ўстойлівай раўнавагі.

Ваганні, пры якіх залежнасць каардынаты (зруху) цела ад часу вызначаецца суадносінамі

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

назваюцца **гарманічнымі**, а сістэма, якая выконвае такія ваганні, — **гарманічнай вагальнай сістэмай**. Залежнасць каардынаты цела ад часу $x(t)$ называецца **кінематычным законам руху**.

Ваганні цела з'яўляюцца **гарманічнымі**, калі яны адбываюцца пад уздзеяннем вяртальнай сілы, праекцыя якой прама прапарцыянальна зруху цела са становішча раўнавагі і накіравана да становішча раўнавагі цела, якое вагаецца, г. зн. $F_x = -kx$.

Ураўненне гарманічных ваганняў:

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

Амплітуда ваганняў A ($A > 0$) — максімальны зрух x_{\max} цела ад становішча раўнавагі.

Перыяд вагання T — час аднаго вагання:

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

Частата ваганняў ν — лік ваганняў, выконваемых за адзінку часу:

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

Цыклічная частата ω — лік ваганняў за прамежак часу $\Delta t = 2\pi$ секунд:

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



Вагальная сістэма, што складаецца з цела масай m і бязважкай спружыны жорсткасцю k , якая злучае цела і апору, называецца **спружынным маятнікам**. Яго перыяд ваганняў:

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

Матэматычным маятнікам называецца цела масай m , падвешанае на бязважкай нерасцяжнай нітцы даўжынёй l , якое знаходзіцца ў полі сілы цяжару. Перыяд малых ваганняў матэматычнага маятніка вызначаецца па **формуле Гюйгенса**:

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

Уласныя (свабодныя) ваганні — гэта ваганні, якія адбываюцца пры адсутнасці знешніх уздзеянняў на сістэму. Пры адсутнасці трэння яны адбываюцца са строга вызначанай частатой, якая называецца **частатой уласных ваганняў** сістэмы.

Затухаючымі называюцца ваганні, энергія якіх памяншаецца з цягам часу.

Вымушанымі называюцца ваганні сістэмы, якія выклікаюцца ўздзеяннем на яе перыядычных знешніх сіл.

Рэзананс — гэта з’ява рэзкага нарастання амплітуды вымушаных ваганняў пры набліжэнні частаты ω знешняй сілы, што дзейнічае на вагальную сістэму, да частаты ω_0 уласных ваганняў сістэмы ($\omega \rightarrow \omega_0$).

Механічнай хваляй называецца працэс распаўсюджвання ваганняў у пругкім асяроддзі, які суправаджаецца перадачай энергіі ад аднаго пункта асяроддзя да другога.

Даўжыня хвалі — адлегласць, пройдзеная хваляй у асяроддзі за прамажак часу, роўны перыяду ваганняў часціц:

$$\lambda = vT.$$

Скорасць распаўсюджвання хвалі — гэта скорасць распаўсюджвання ваганняў у пругкім асяроддзі. Модуль скорасці распаўсюджвання хвалі:

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



Хваля называецца **падоўжнай**, калі ваганні часціц асяроддзя адбываюцца ўздоўж напрамку распаўсюджвання хваль.

Хваля называецца **папярочнай**, калі часціцы асяроддзя вагаюцца ў плоскасці, перпендыкулярнай да напрамку распаўсюджвання хвалі.

Пругкія хвалі, якія выклікаюць у чалавека гукавыя адчужванні, называюцца **гукавымі хвалямі** або проста **гукам**.

Асноўнымі **фізічнымі** характарыстыкамі гуку з’яўляюцца *інтэнсіўнасць* і *спектральны састаў* (*спектр*). Асноўнымі **фізіялагічнымі** характарыстыкамі гуку з’яўляюцца *гучнасць*, *вышыня* і *тэмбр*.

Адзінкі асноўных велічынь механічных ваганняў і хваль

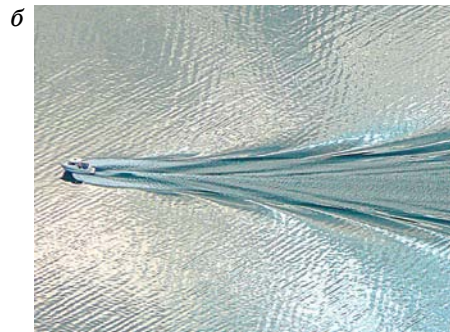
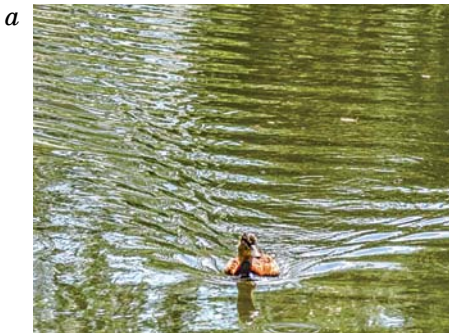
Найменне	Абзначэнне	Адзінка	Выражэнне праз асноўныя адзінкі ў СІ
Частата	ν	Герц (Гц)	с^{-1}
Перыяд	T	Секунда (с)	с
Цыклічная (кругавая) частата	ω	Радыян за секунду $\left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)$	с^{-1}
Амплітуда	A	Метр (м)	м
Даўжыня хвалі	λ	Метр (м)	м
Модуль скорасці хвалі	v	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\frac{\text{м}}{\text{с}}$

Заданні для самастойных даследаванняў

1. Падрыхтуйце інтэрактыўную прэзентацыю (флаер, плакат, рэферат) аб дзейнасці выдатных фізікаў (Г. Галілей, Х. Гюйгенс).

2. Падрыхтуйце інтэрактыўныя прэзентацыі на тэмы: «Выкарыстанне ультрагукавых хваль у медыцыне, тэхніцы, побытавых прыборах», «Шум і яго ўздзеянне на чалавека», «Інфрагук — прымяненне і барацьба з ім».

3. Калі назіраць за качкай, якая плыве ў сажалцы (мал. 49, а), ці з вышыні за катарам, які рухаецца па паверхні возера (мал. 49, б), то



Мал. 49



Мал. 50



Мал. 51

можна заўважыць, што ствараемыя імі хвалі разыходзяцца пад некаторым вуглом да напрамку руху качкі (катара). Раствлумачце гэту з’яву і вызначыце, як залежыць вугал разыходжання хваль на вадзе ад скорасці качкі (катара).

4. Часткова напоўніце вадой бакал, намачыце вадой палец і акуратна вадзіце ім па краі бакала (мал. 50). Праз некаторы час бакал пачне звінець. Змяняючы ўзровень вады ў бакале, можна дабіцца змянення вышыні гуку. Раствлумачце гэту з’яву і падбярыце ўзроўні вады так, каб гучанне бакала адпавядала музычным нотам. Ці можна сыграць на такіх бакалах простую мелодыю?

5. Калі злучыць донцы дзвюх пластыкавых шклянак (або бляшанак) ніткай (мал. 51) і нацягнуць яе, то ўтворыцца так званы «струнны тэлефон». Вывучыце залежнасць інтэнсіўнасці гуку ў «струнным тэлефоне» ад даўжыні ніткі і сілы яе нацяжэння.

