

А. В. ПЁРЫШКІН

КУРС ФІЗИКІ

ЧАСТКА II

ДЗЯРЖАЎНАЕ
ВУЧЭБНА-ПЕДАГАГІЧНАЕ ВYДАВЕСТВА
МІНІСТЭРСТВА АСВЕТЫ БССР
МІНСК 1958

А. В. ПЁРЫШКІН

КУРС ФІЗІКІ

ЧАСТКА ДРУГАЯ

МЕХАНІКА (працяг), ЦЕПЛЫНЯ
І МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА

ПАДРУЧНІК ДЛЯ IX КЛАСА
СЯРЭДНЯЙ ШКОЛЫ

ВЫДАННЕ ПЯТАЕ З ПЯТАГА РУСКАГА

Зацверджан
Міністэрствам асветы РСФСР

ДЗЯРЖАЎНАЕ
ВУЧЭБНА-ПЕДАГАГІЧНАЕ ВЫДАВЕЦТВА
МІНІСТЭРСТВА АСВЕТЫ БССР
МІНСК 1958

Абдзел цеплыні і малекулярнай фізікі складзены
пры ўдзеле Н. П. Суворова.

АДДЗЕЛ І. МЕХАНІКА (працяг).

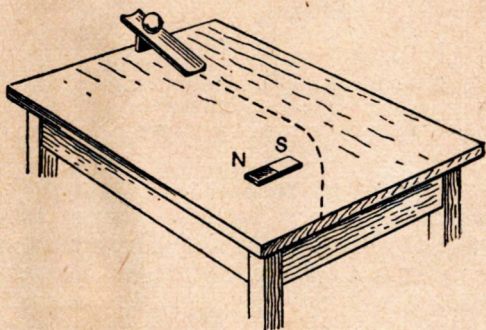
РАЗДЗЕЛ І.

КРЫВАЛІНЕЙНЫ РУХ ЦЕЛ. ВЯРЧАЛЬНЫ РУХ.

1. Рух цела пад дзеяннем сілы, накіраванай пад вуглом да скорасці. Пры разглядзе прамалінейнага руху было паказана, што калі на цела падзейнічае сіла ў напрамку руху, то рух цела будзе заставацца прамалінейным. Змяняцца будзе толькі велічыня скорасці. Пры гэтым, калі напрамак сілы супадае з напрамкам скорасці, рух будзе прамалінейным і паскораным. У выпадку ж праціўлелага напрамку сілы рух будзе прамалінейным і запаволеным. Такімі, напрыклад, будуць рух цела, кінутага вертыкальна ўніз, і рух цела, кінутага вертыкальна ўверх.

Разгледзім цяпер, як будзе рухацца цела пад дзеяннем сілы, накіраванай пад вуглом да напрамку скорасці.

Звернемся спачатку да доследу. На рыс. 1 паказана траекторыя руху жалезнага шарыка. Па ёй відаць, што ўдалечыні ад магніта шарык рухаўся прамалінейна, пры набліжэнні ж да магніта траекторыя шарыка скрывілася, і шарык пачаў рухацца па крывой. Напрамак скорасці яго пры гэтым бесперапынна мяняўся. Прычынай гэтага было дзеянне магніта на шарык.



Рыс. 1. Магніт скрывіляе траекторыю шарыка.

Мы можам прымусіць рухацца па крывой цела, якое прамалінейна перамяшчаецца, калі будзем штурхаць яго, цягнуць за прывязаную да яго нітку і гэтак далей, толькі б сіла была накіраваная пад вуглом да скорасці перамяшчэння цела.

Такім чынам, **крывалінейны рух цела адбываецца пад дзеяннем сілы, накіраванай пад вуглом да напрамку скорасці цела.**

У залежнасці ад напрамку і велічыні сілы, дзеючай на цела, крывалінейныя рухі могуць быць самымі разнастайнымі. Найбольш

простыми видами криволінейных рухаў з'яўляюцца: рух па акружнасці, па параболе і эліпсу.

Разгледзім цяпер пытанне аб напрамку вектара скорасці ў криволінейным руху. У выпадку прамалінейнага руху напрамак вектара скорасці супадае з напрамкам руху. Але ў криволінейным руху няма пастаяннага напрамку перамяшчэння. Што ж у такім выпадку трэба лічыць за напрамак скорасці ў криволінейным руху?

Прасцей за ўсё ўстанавіць напрамак вектара скорасці пры руху цела па акружнасці. Прывядзём у хуткае вярчэнне тачыльны камень і дакранёмся да яго кавалкам сталі. Мы ўбачым цэлы сноп іскрыў, якія вылітаюць з месца дакранання сталі да каменя (рыс. 2).

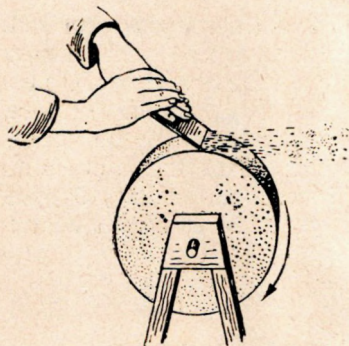


Рис. 2. Искры з-пад прадмета, які абточваецца на тачыльным кругу, ляцяць па датычных да акружнасці.

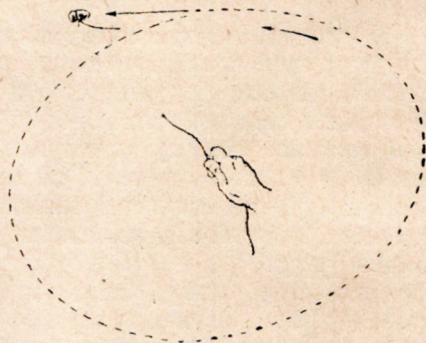


Рис. 3. Камень, які рухаецца па акружнасці, пры абрыве ніткі адлятае па датычнай да акружнасці.

Гэта дробныя распаленыя частачкі каменя і сталі, адарваўшыся, ляцяць па інерцыі прамалінейна са скорасцю, якую яны мелі ў момант адрыву. Перамяшчаючы кавалак сталі па акружнасці каменя, можна бачыць, што ва ўсіх выпадках іскры ляцяць па датычнай да акружнасці ў тым пункце, да якога дакранаецца сталь.

Па датычнай жа да акружнасці паляціць камень, які верціцца на нітцы, калі нітка раптам абарвецца (рыс. 3).

З апісаных доследаў вынікае, што **скорасць у дадзеным пункце акружнасці накіравана па датычнай да акружнасці ў гэтым пункце.**

Гэты вывад можна пашырыць на любы криволінейны рух.

Няхай $ABCD$ (рыс. 4) — траекторыя руху.

Дапусцім, што перамяшчэнне пункта адбываецца не па крывой, а па ломанай $AB - BC - CD...$

Напрамак вектара скорасці на ўчастках ломанай будзе супадаць з хордамі, змяняючыся толькі ў пунктах $A, B, C...$ Разбіваючы траекторыю $ABCD...$ на большы лік частак, мы робім прамалінейныя ўчасткі шляху ўсё больш карацейшымі. Пры гэтым перамяшчэнне па хордах будзе ўсё менш адрознівацца ад перамяшчэння па крывой $ABCD$.

Хорды ж AB , BC , CD усё бліжэй і бліжэй будуць падыходзіць да датычных у пунктах A , B , C , D ...

У прэдзе, калі, напрыклад, адрэзак AB стане бясконца малым, г. зн. пункт B стане бясконца бліжкім да пункта A , хорда AB супадзе па напрамку з датычнай AV . Таксама і напрамак скорасці па прамалінейнаму ўчастку хорды AB у прэдзе прыме напрамак датычнай у пункце A . Аналагічныя разважанні можна правесці адносна любога іншага пункта B , C , D ... траекторыі.

Такім чынам, **скорасць у дадзеным пункце крывалінейнай траекторыі накіравана па датычнай, праведзенай да крывой у гэтым пункце.**

2. Незалежнасць рухаў. Рух цела, кінутага гарызантальна. Усякі крывалінейны рух з'яўляецца складаным рухам, у які ўваходзяць рух па інерцыі і рух пад дзеяннем сілы, накіраванай пад вуглом да скорасці цела. Гэта можна паказаць на наступным прыкладзе.

Дапусцім, што шарык скочаецца са стала, вага яго больш ужо не ўраўнаважваецца ціскам стала, і ён па інерцыі, захоўваючы раўнамерны і прамалінейны рух, адначасова пачынае падаць. У выніку складання рухаў — раўнамернага прамалінейнага па інерцыі і роўнапаскоранага пад дзеяннем сілы цяжару — шарык перамяшчаецца па крывой лініі (рис. 5).

Можна на доследзе паказаць, што абодва гэтыя рухі, раўнамерны і роўнапаскораны, адбываюцца незалежна адзін ад другога.

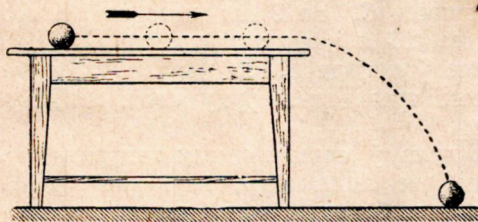


Рис. 5. Траекторыя руху шарыка, скінутага са стала.

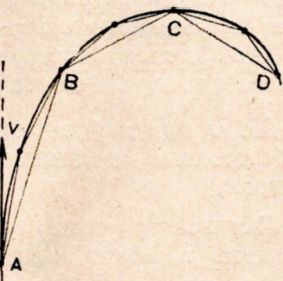


Рис. 4. Скорасць у крывалінейным руху накіравана па датычнай да крывой у дадзеным пункце траекторыі.

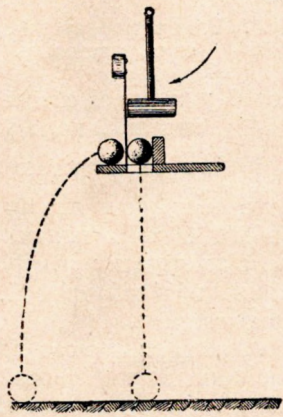


Рис. 6. Абодва шарыкі дасягаюць падлогі адначасова.

На рис. 6 паказана спружына, якая, выгінаючыся пад ударам малатка, можа прывесці адзін шарык у рух у гарызантальным напрамку і адначасова вызваліць другі шарык, так што абодва яны

пачнуць рух у адзін і той жа момант: першы — па крывой, другі — па вертыкалі ўніз. Абодва шарыкі ўдарацца аб падлогу адначасова; значыць, час падзення абодвух шарыкаў аднолькавы. Адсюль можна вывесці, што рух шарыка пад дзеяннем сілы цяжару не залежыць ад таго, знаходзіўся шарык у пачатковы момант у стане спакою ці ён рухаўся ў гарызантальным напрамку.

Гэты дослед ілюструе вельмі важнае палажэнне механікі, якое называецца прынцыпам незалежнасці рухаў.

Калі цела ўдзельнічае адначасова ў некалькіх рухах, то кожны з гэтых рухаў адбываецца незалежна ад іншых.

Скарыстаем гэты прынцып для пабудавання траекторыі цела, кінутага гарызантальна, напрыклад, з вышыні 45 м са скорасцю $v = 20 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Прымем $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$.

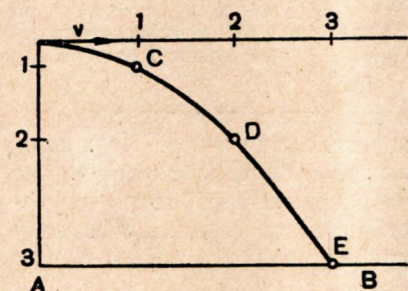


Рис. 7. Траекторыя руху цела, кінутага гарызантальна.

На рис. 7 лініяй АВ абазнача- на паверхня Зямлі.

Калі б Зямля не прыцягвала цела, то яно па інерцыі рухалася б раўнамерна і, прайшоўшы па гарызанталі за 1 сек 20 м, заняло б у канцы першай секунды становішча, адзначанае на гарызантальнай прамой лічбай 1. З другога боку, калі б яно з гэтай жа вышыні толькі свабодна падала, то за 1 сек падзення прайшло б 5 м і ў канцы першай секунды знаходзі-

лася б у пункце, абазначаным на вертыкалі лічбай 1.

Але паколькі цела ў адзін і той жа час рухаецца раўнамерна прамалінейна са скорасцю $20 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ і падае, то ў канцы першай секунды ад пачатку руху яно будзе ў пункце С. За 2 сек цела па інерцыі пройдзе 40 м, а падаючы, пройдзе 20 м і будзе ў пункце D. Праз 3 сек ад пачатку руху цела будзе ў пункце E. Злучыўшы ўказаныя пункты плаўнай крывой, атрымаем траекторыю руху цела, кінутага гарызантальна.

Адлегласць, якую праходзіць цела ў вертыкальным напрамку, не залежыць ад пачатковай скорасці, але адлегласць, якую праходзіць яно ў гарызантальным напрамку, тым большая, чым большая пачатковая скорасць.

Прыклад. З самалёта, які ляціць гарызантальна на вышыні 2 км са скорасцю $360 \frac{\text{км}}{\text{гадз}}$, трэба скінуць груз так, каб ён упаў у вызначанае месца. На якой адлегласці ад гэтага месца павінен быць скінут груз? Супраціўленне паветра не ўлічваць; прыняць $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$.

Рашэнне. Вызначым, колькі часу будзе падаць груз з вышыні $h = 2$ км. Па формуле $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ знойдзем, што $t = \sqrt{\frac{2 \cdot 2000 \text{ м}}{10 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}}} = 20 \text{ сек.}$ Столькі ж часу груз будзе рухацца ў гарызантальным напрамку са скорасцю $v = 360 \frac{\text{км}}{\text{гадз}} = 100 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Значыць, каб груз упаў у вызначаным месцы, ён павінен быць скінут на адлегласці $S = 100 \frac{\text{м}}{\text{сек}} \cdot 20 \text{ сек} = 2000 \text{ м}$ ад гэтага месца.

Практыкаванне 1.

1. Пабудаваць траекторыю руху цела, кінутага гарызантальна са скорасцю $30 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ з вышыні 80 м.

Вызначыць, на якой адлегласці ад месца кідання цела ўпадзе на зямлю і скорасць яго ў момант удару аб зямлю. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

Прыняць $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$.

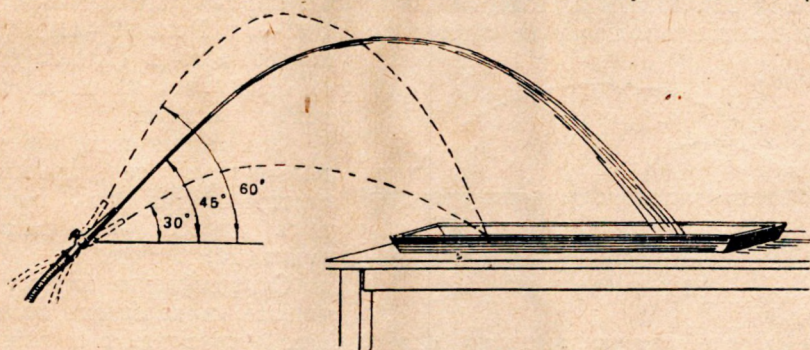
2. З мачты парахода з вышыні 10 м над палубай упусцілі мяч. Скорасць парахода $18 \frac{\text{км}}{\text{гадз}}$. На колькі паспее перамясціцца параход за час падзення мяча? Дзе ўпадзе мяч? Якая траекторыя руху мяча ў адносінах да паверхні мора? Якая скорасць мяча ў момант удару аб палубу?

3. На краі стала ляжыць кавалачак крэйды. Крэйдзе надалі гарызантальны штуршок у напрамку, перпендыкулярным к класнай дошцы. След ад удару крэйды аб дошку ляжыць на 20 см ніжэй паверхні стала. Адлегласць дошкі ад краю

стала 1 м. Вызначыць пачатковую скорасць крэйды. Прыняць $g = 10 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$.

4. З якой скорасцю трэба кінучь цела ў гарызантальным напрамку з вышыні 20 м, каб скорасць яго ў момант падзення на зямлю была $625 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$?

Указанне. Рашыць гэтую задачу на падставе закону захавання энергіі.

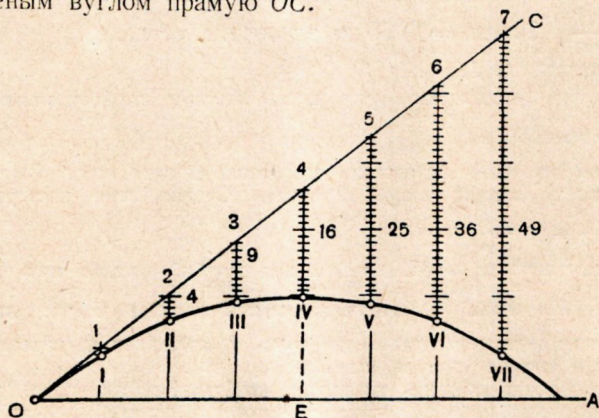


Рыс. 8. Траекторыі, апісваемыя часткамі вады ў струмені, накіраваным пад рознымі вугламі да гарызонта.

3. Рух цела, кінутага пад вуглом да гарызонта. Кінем якое-небудзь цела пад вуглом да гарызонта. Назіраючы за яго рухам, мы заўважым, што цела спачатку падымаецца, рухаючыся па крывой, потым таксама па крывой падае ўніз.

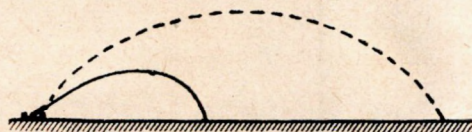
Калі накіроўваць струмень вады пад рознымі вугламі да гарызонта, то можна бачыць, што спачатку з павелічэннем вугла струмень б'е ўсё далей і далей. Пры вугле ў 45° да гарызонта (калі не ўлічваць супраціўлення паветра) далёкасць найбольшая. Пры далейшым павелічэнні вугла далёкасць памяншаецца (рыс. 8).

Для пабудавання траекторыі руху цела, кінутага пад вуглом да гарызонта, правядзём гарызантальную прамую OA (рыс. 9) і да яе пад зададзеным вуглом прамую OC .



Рыс. 9. Пабудаванне траекторыі цела, кінутага пад вуглом да гарызонта.

На лініі OC у выбраным маштабе адкладваем адрэзкі, лікава роўныя шляхам, пройдзеным у напрамку кідання (0—1, 1—2, 2—3, 3—4). З пунктаў 1, 2, 3 і г. д. апускаем перпендыкуляры на OA і на іх адкладваем адрэзкі, лікава роўныя шляхам, праходзімым свабодна падаючым целаў на працягу 1 сек (1—I), 2 сек (2—II), 3 сек (3—III) і г. д. Пункты 0, I, II, III, IV і г. д. злучаем плаўнай крывой.



Рыс. 10. Траекторыя цела ў паветры (суцэльная крывая) і пры адсутнасці паветра (пункцірная крывая).

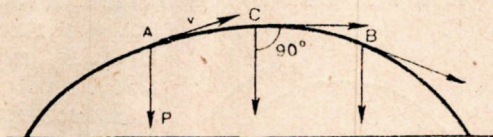
Траекторыя цела, кінутага пад вуглом да гарызонта, сіметрычна адносна вышэйшага пункта (на рыс. 9 пункт IV).

Супраціўленне паветра памяншае як далёкасць палёту, так і найбольшую вышыню палёту цела, і траекторыя іх робіцца несіметрычнай. Такія, напрыклад, траекторыі снарадаў і куль. На рыс. 10 суцэльная крывая паказвае схематычна траекторыю снарада ў паветры, а пункцірная — у беспаветранай прасторы. Наколькі супраціўленне паветра змяняе далёкасць палёту, відаць з наступнага прыкладу. Пры адсутнасці супраціўлення паветра снарад 76-мм гарматы выпушчаны пад вуглом 20° да гарызонта, праляцеў бы 24 км. У паветры ж гэты снарад пралятае каля 7 км.

Разгледзім цяпер, як мяняецца скорасць цела, кінутага пад вуглом да гарызонта, у адсутнасці супраціўлення паветра.

З рис. 11 відаць, што ў любым пункце траекторыі, узятым злева ад найвышэйшага пункта C , напрыклад у пункце A , сіла цяжару P накіравана пад тупым вуглом да скорасці цела. На гэтым участку траекторыі цела рухаецца ўверх запаволена; сіла цяжару, дзеючая на цела, памяншае яго скорасць па велічыні і мяняе яе па напрамку.

На ўчастку ж траекторыі, узятым справа ад пункта C , напрыклад у пункце B , напрамак сілы цяжару складае з напрамкам скорасці востры вугал. На гэтым участку цела рухаецца паскорана, сіла цяжару павялічвае яго скорасць па велічыні і мяняе яе па напрамку.



Рыс. 11. Пры руху цела, кінутага пад вуглом да гарызонта, вуглы паміж напрамкам сілы цяжару і скорасці ва ўсіх пунктах траекторыі розныя.

У найвышэйшым пункце траекторыі C скорасць цела накіравана гарызантальна, сіла цяжару ў гэтым выпадку ўтварае з напрамкам скорасці прамы вугал.

Практыкаванне 2.

Пабудавать траекторыю руху цела, кінутага пад вуглом 45° да гарызонта са скорасцю $40 \frac{м}{сек}$ у маштабе $10 м$ у $1 см$. Прыняць $g = 10 \frac{м}{сек^2}$.

Вызначыць па графіку далёкасць і найбольшую вышыню палёту цела.

Знайсці па графіку гарызантальную і вертыкальную складаючыя скорасці цела ў яким-небудзь пункце траекторыі.

Па знойдзеных складаючых вылічыць далёкасць і найбольшую вышыню палёту цела. Параўнаць з данымі чарцяжа.

Якая павінна быць скорасць цела ў момант падзення на зямлю, калі не ўлічваць супраціўлення паветра?

4. Раўнамерны рух па акружнасці. Вуглавая скорасць. Перыяд абарачэння. Адным з найпрасцейшых і вельмі распаўсюджаных відаў крывалінейнага руху з'яўляецца раўнамерны рух цела па акружнасці. Па акружнасці, напрыклад, рухаюцца часткі махавікоў, пункты зямной паверхні пры сутачным вярчэнні Зямлі і г. д.

Увядзём велічыні, якія характарызуюць гэты рух. Звернемся да рыс. 12. Няхай пры вярчэнні цела адзін з яго пунктаў за час t перайшоў з A ў B . радыус, які злучае пункт A з цэнтрам акружнасці, павярнуўся пры гэтым на вугал φ (грэч. «фі»). Хуткасць вярчэння цела можна характарызаваць велічынёй адносіны вугла φ да часу t : $\frac{\varphi}{t}$.

Велічыня, якая вымяраецца адносінай вугла павароту радыуса, што злучае рухаючыся пункт з цэнтрам вярчэння, да прамежку часу, за які адбываецца гэты паворот, называецца вуглавой скорасцю.

Абазначаючы вуглавую скорасць грэчаскай літарай ω («амега»), можна напісаць:

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

Пры $t = 1$ сек $\omega = \varphi$, г. зн. **вуглавая скорасць лікава роўна вуглу павароту ў адзінку часу.**

Пры раўнамерным руху па акружнасці вуглавая скорасць ёсць велічыня пастаянная.

Пры вылічэнні вуглавой скорасці вугал павароту прынята вымяраць у радыянах. Радыян ёсць цэнтральны вугал, даўжыня дугі якога роўна радыусу гэтай дугі.

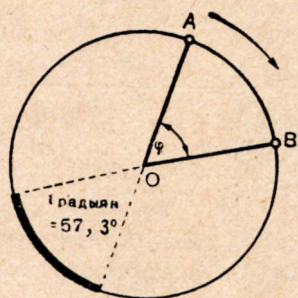


Рис. 12. Да паняцця вуглавой скорасці.

За адзінку вуглавой скорасці прымаецца 1 радыян у секунду, г. зн. такая вуглавая скорасць, пры якой за 1 сек радыус пункта паварочваецца на вугал, роўны 1 радыяну (на рис. 12 — вугал φ).

У тэхніцы вуглавую скорасць вярчэння цела вымяраюць лікам абаротаў у адзінку часу (у секунду або ў мінуту). Так, напрыклад, скорасць шківа малатарні — $1070 \frac{\text{аб}}{\text{мін}}$. Скорасць якара электрарухаві-

ка — $1440 \frac{\text{аб}}{\text{мін}}$, скорасць махавіка нафтавага рухавіка — $300 \frac{\text{аб}}{\text{мін}}$ і г. д.

Вуглавую скорасць, зададзеную ў $\frac{\text{рад}}{\text{сек}}$, можна выразіць праз лік абаротаў у секунду і, наадварот, лік абаротаў у секунду выразіць праз $\frac{\text{рад}}{\text{сек}}$. Разгледзім гэта на прыкладзе.

Вуглавая скорасць махавіка $300 \frac{\text{аб}}{\text{мін}}$. Выразіць яе ў $\frac{\text{рад}}{\text{сек}}$. Вывядзім спачатку лік абаротаў у секунду; ён будзе роўны: $\frac{300}{60} = 5$. За адзін абарот махавік паварочваецца на вугал 360° , што адпавядае 2π радыянам, а за 5 абаротаў ён павернецца на вугал, роўны $2\pi \text{ рад} \times 5 = 10\pi \text{ рад}$. Значыць, вуглавая скорасць махавіка роўна $31,4 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}$.

Такім чынам, каб вуглавую скорасць, зададзеную ў $\frac{\text{аб}}{\text{сек}}$, выразіць у $\frac{\text{рад}}{\text{сек}}$, трэба памножыць лік абаротаў у секунду n на 2π :

$$\omega = 2\pi n.$$

¹ Цэнтральны вугал, даўжыня дугі якога роўна даўжыні акружнасці $2\pi R$, роўны 360° . З другога боку, даўжыні акружнасці адпавядае вугал $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$ радыанаў. Значыць, вугал 360° змяшчае 2π радыанаў.

Паколькі радыян ёсць абстрактная мера вугла, то назвай вуглавой скорасці будзе: $\frac{1}{сек}$.

Час, на працягу якога пункт, рухаючыся па акружнасці, робіць адзін абарот, называецца перыядам абарачэння.

Перыяд абарачэння абазначаюць літарай T і вымяраюць у секундах.

Калі, напрыклад, за 1 сек пункт робіць 10 абаротаў, то час аднаго абарота, або перыяд абарачэння, ровен $\frac{1}{10}$ сек. Пры n абаротах у 1 сек перыяд абарачэння

$$T = \frac{1}{n}.$$

5. Лінейная скорасць. Сувязь паміж вуглавой і лінейнай скорасцямі. Для характарыстыкі вярчальнага руху, апрача вуглавой скорасці, уводзіцца паняцце лінейнай скорасці.

Лінейнай скорасцю называецца скорасць руху пункта па акружнасці. Лікава яна роўна даўжыні дугі акружнасці, якую пункт праходзіць у адзінку часу.

Формулу для велічыні лінейнай скорасці можна вывесці на падставе наступных разважанняў.

Пункт, які ляжыць на акружнасці радыуса R , за адзін абарот пройдзе шлях, роўны даўжыні акружнасці $2\pi R$; для гэтага спатрэбіцца час, роўны перыяду T . Калі ўзяць адносіну шляху $2\pi R$ да часу T , мы атрымаем скорасць руху пункта па акружнасці:

$$v = \frac{2\pi R}{T}. \quad \text{Але } \frac{1}{T} = n; \text{ значыць,} \\ v = 2\pi Rn. \quad (1)$$

Адсюль лёгка вызначыць сувязь паміж лінейнай і вуглавой скорасцямі. Мы ўжо ведаем, што вуглавая скорасць звязана з лікам абаротаў формулай $\omega = 2\pi n$; таму, на падставе формулы (1), атрымаем:

$$v = \omega R. \quad (2)$$

Лінейная скорасць пункта, які рухаецца раўнамерна па акружнасці, роўна вуглавой скорасці, памножанай на радыус акружнасці.

У § 1 было паказана, што вектар скорасці пункта, які рухаецца па акружнасці, накіраван па датычнай. Значыць, **лінейная скорасць накіравана па датычнай да акружнасці.**

З формулы (2) відаць, што лінейная скорасць вымяраецца ў $\frac{см}{сек}$, і г. д.

Прыклад 1. Махавік, які раўнамерна верціцца, робіць 300 $\frac{аб}{мін}$. Чаму роўна лінейная скорасць пункта махавіка, які знаходзіцца ад восі вярчэння на адлегласці 1 м?

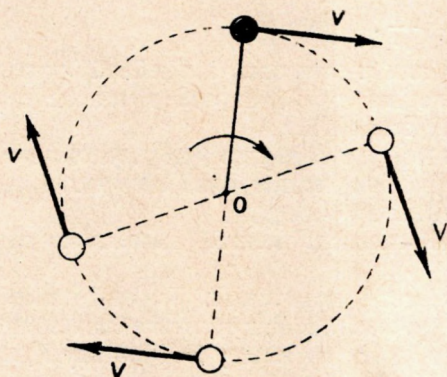
Вылічваем па формуле $v = 2\pi Rn$

$$v = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 300 \cdot 1_m}{60 \text{ сек}} = 31,4 \frac{м}{сек}.$$

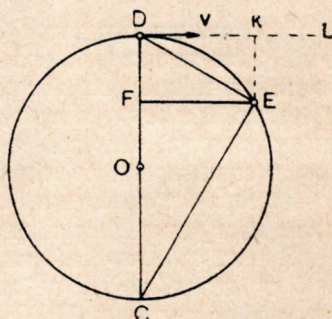
Прыклад 2. Вызначыць вуглавую і лінейную скорасці экватарыяльных пунктаў зямной паверхні пры сутачным вярчэнні Зямлі вакол восі. Радыус Зямлі прыняць роўным 6400 км.

Вуглавая скорасць вызначыцца з роўнасці $\omega = \frac{2\pi}{t}$, дзе $t = 24 \cdot 3600 \text{ сек.}$

$$\omega = \frac{2 \cdot 3,14}{24 \cdot 3600 \text{ сек}} \approx 0,00007 \frac{1}{сек}.$$



Рыс. 13. Пры раўнамерным руху па акружнасці вектары скорасці ў розныя моманты часу роўныя па велічыні, але розныя па напрамку.



Рыс. 14. Да вываду формулы для дацэнтрабежнага паскарэння.

Лінейная скорасць $v = \omega R$; значыць:

$$v = 0,00007 \frac{1}{сек} \times 6\,400\,000 \text{ м} \approx 450 \frac{м}{сек}.$$

6. Дацэнтрабежнае паскарэнне. У § 1 было паказана, што ўсякі крывалінейны рух адбываецца пад дзеяннем сілы, накіраванай пад вуглом да скорасці. У выпадку раўнамернага руху па акружнасці гэты вугал будзе прамым. Сапраўды, калі, напрыклад, вярцець шарык, прывязаны да вяроўкі, то напрамак скорасці шарыка ў любы момант часу перпендыкулярны вяроўцы (рыс. 13). Сіла ж нацяжэння вяроўкі, якая ўтрымлівае шарык на акружнасці, накіравана ўздоўж вяроўкі да цэнтра вярчэння.

Сіла, якая ўтрымлівае цела, што верціцца, на акружнасці і накіравана да цэнтра вярчэння, называецца дацэнтрабежнай сілай.

Па другому закону Ньютана гэтая сіла будзе выклікаць паскарэнне цела ў тым жа напрамку. **Паскарэнне, накіраванае па радыусу да цэнтра вярчэння, называецца дацэнтрабежным паскарэннем.**

Да пытання аб дацэнтрабежнай сіле мы вернемся яшчэ ў § 7 і 8, у гэтым жа параграфі выведзем формулу для вызначэння велічыні дацэнтрабежнага паскарэння.

Перш за ўсё заўважым, што рух па акружнасці з'яўляецца складаным рухам. Пад дзеяннем дацэнтрабежнай сілы цела рухаецца да цэнтра вярчэння і адначасова па інерцыі аддаляецца ад гэтага цэнтра па датычнай да акружнасці.

Звернемся да рис. 14. Няхай за час t цела, рухаючыся раўнамерна са скорасцю v , перамясцілася з D у E . Дапусцім, што ў той момант, калі цела знаходзілася ў пункце D , на яго перастала б дзейнічаць дацэнтрабежная сіла. Тады за час t яно перамясцілася б у пункт K , які ляжыць на датычнай DL . А калі ў гэты ж момант цела аказалася б пад дзеяннем толькі адной дацэнтрабежнай сілы (не рухалася па інерцыі), то яно за час t перамясцілася б у пункт F , які ляжыць на прамой DC . У выніку ж складання гэтых перамяшчэнняў за час t атрымліваецца рэзультуючы рух па дузе DE .

Возьмем прамежак часу t такі малы, каб дуга DE мала адрознівалася ад хорды DE , г. зн. заменім рух па дузе DE рухам па хордзе. У гэтым выпадку шлях цела па хордзе DE будзе ровен vt , г. зн. $DE = vt$.

Абзначым праз a шукаемае дацэнтрабежнае паскарэнне. Тады шлях DF , які цела праходзіць за час t пад дзеяннем толькі адной дацэнтрабежнай сілы, выразіцца вядомай формулай шляху роўнапа-скаранага руху:

$$DF = \frac{at^2}{2}.$$

Цяпер выкарыстаем вядомую геаметрычную тэарэму¹, па падставе якой:

$$(DE)^2 = DC \cdot DF. \quad (1)$$

Паколькі $DE = vt$; $DF = \frac{at^2}{2}$, $DC = 2R$ (гл. рис. 14), то з роў-

насці (1) пасля простых пераўтварэнняў атрымліваецца формула для дацэнтрабежнага паскарэння:

$$a = \frac{v^2}{R}. \quad (2)$$

Велічыня дацэнтрабежнага паскарэння пункта роўна дзелі ад дзялення квадрата лінейнай скорасці на радыус акружнасці.

Дацэнтрабежнае паскарэнне можна выразіць таксама праз вуглавую скорасць і радыус акружнасці.

Мы ведаем, што $v = \omega R$, дзе ω — вуглавая скорасць. Калі падставіць гэтае значэнне скорасці ў формулу (2), то атрымаем:

$$a = \omega^2 R.$$

¹ Перпендыкуляр, апушчаны з якога-небудзь пункта акружнасці на дыяметр, ёсць сярэдняя прапарцыянальная велічыня паміж адрэзкамі дыяметра, а хорда, праведзеная з таго ж пункта к канцу дыяметра, ёсць сярэдняя прапарцыянальная паміж дыяметрам і прылеглым адрэзкам.

7. **Дацэнтрабежная сіла.** Каб атрымаць формулу для разліку велічыні дацэнтрабежнай сілы, трэба выкарыстаць другі закон Ньютана, які прымянім і да любога крывалінейнага руху.

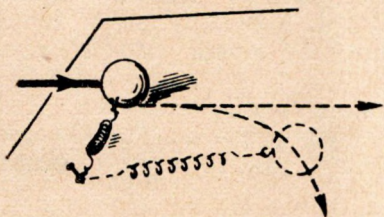
Падстаўляючы ў формулу $F = ma$ значэнне дацэнтрабежнага паскарэння $a = \frac{v^2}{R}$, атрымаем формулу дацэнтрабежнай сілы:

$$F = \frac{mv^2}{R}. \quad (1)$$

Велічыня дацэнтрабежнай сілы роўна здабытку масы цела на квадрат лінейнай скорасці, падзеленаму на радыус.

Калі дадзена вуглавая скорасць цела, то дацэнтрабежную сілу зручней разлічваць па формуле $F = m\omega^2 R$, дзе $\omega^2 R$ — дацэнтрабежнае паскарэнне.

З формулы (1) відаць, што, пры адной і той жа скорасці, чым меншы радыус акружнасці, тым большая дацэнтрабежная сіла. Так,



Рыс. 15. Сіла пругкасці спружыны дзейнічае на шарык як дацэнтрабежная сіла.

напрыклад, на паваротах дарогі на цела, якое рухаецца (поезд, аўтамабіль, веласіпед), павінна дзейнічаць па напрамку да цэнтра закруглення тым большай сіла, чым большы круты паварот, г. зн. чым меншы радыус закруглення.

Дацэнтрабежная сіла залежыць ад лінейнай скорасці: з павелічэннем скорасці яна павялічваецца. Гэта добра вядома ўсім канькабежцам, лыжнікам і веласіпедыстам: чым з большай скорасцю рухаешся,

тым цяжэй зрабіць паварот. Шафёры вельмі добра ведаюць, як небяспечна крута паварочваць аўтамабіль на вялікай скорасці.

Прымацуюм які-небудзь грузік да дынамометра і, трымаючы за кольца дынамометра, раскруцім грузік у гарызантальнай плоскасці. Дынамометр пакажа сілу, якая ўтрымлівае грузік на акружнасці, г. зн. дацэнтрабежную сілу. Са змяненнем скорасці руху мяняецца і велічыня дацэнтрабежнай сілы.

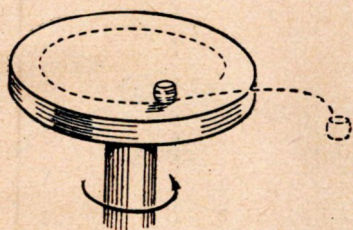
Мяняючы масы грузікаў і кожны раз вымяраючы сілу, дзеючую на грузік, можна ўстанавіць залежнасць велічыні дацэнтрабежнай сілы ад масы цела на доследзе.

Дацэнтрабежная сіла не з'яўляецца нейкай асаблівай сілай. Як і ўсякая сіла, дацэнтрабежная сіла характарызуе дзеянне на дадзенае цела іншых якіх-небудзь цел. Дацэнтрабежнай сілай можа быць **любая сіла, якая ўтрымлівае цела на крывалінейнай траекторыі**, напрыклад сіла трэння, сіла пругкасці, сіла цяжання.

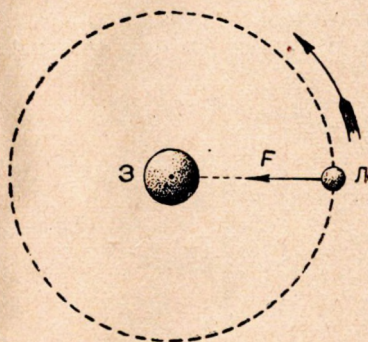
Разгледзім некаторыя прыклады. Прымацуюм спружыну да цяжкага шарыка так, як гэта паказана на рыс. 15. Штуршком прымусім наш шарык рухацца ў напрамку, паказаным стрэлкай. Спачатку шарык па інерцыі будзе рухацца прамалінейна. Адлегласць паміж ім і пунктам замацавання пачне ўзрастаць, і спружына будзе расцягвацца.

Пры гэтым узнікне сіла пругкасці, дзеючая на шарык у напрамку да пункта замацавання. Гэтая сіла выкліча паскарэнне руху шарыка ў гэтым жа напрамку і будзе ўтрымліваць яго на крывалінейнай траекторыі. У той момант, калі сіла пругкасці спружыны стане роўнай дацэнтрабежнай сіле $\frac{mv^2}{R}$, шарык пачне рухацца па акружнасці радыуса R .

У гэтым доследзе сіла пругкасці спружыны з'яўляецца дацэнтрабежнай сілай.



Рыс. 16. Пры павелічэнні скорасці вярчэння дыска цела не ўтрымліваецца на акружнасці і злітае з дыска.



Рыс. 17. Сіла цягання F , дзеючая на Луну з боку Зямлі, з'яўляецца дацэнтрабежнай сілай.

Пакладзём на дыск якое-небудзь цела (рыс. 16). Пры вярчэнні дыска разам з ім будзе вярцецца і цела, утрымліваючыся на акружнасці сілай трэння спакою. Калі павялічыць скорасць вярчэння дыска, то сіла трэння спакою, існуючая паміж паверхняй дыска і целам, можа аказацца недастатковай для ўтрымання цела на акружнасці, і яно зляціць з дыска. У гэтым доследзе дацэнтрабежнай сілай з'яўляецца сіла трэння спакою.

Сіла прыцяжэння F , дзеючая на Луну з боку Зямлі (рыс. 17), з'яўляецца дацэнтрабежнай сілай; яна абумоўлівае рух Луны вакол Зямлі.

8. Прыклады дзеяння дацэнтрабежнай сілы. У некаторых выпадках дацэнтрабежная сіла з'яўляецца раўнадзеючай двух сіл, якія дзейнічаюць на цела, што рухаецца па акружнасці.

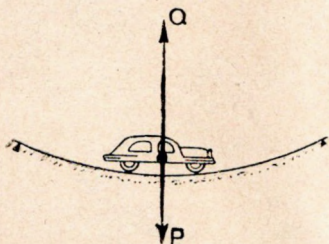
Разгледзім некалькі такіх прыкладаў.

1. Па ўвагнутым мосце рухаецца аўтамабіль са скорасцю v , маса аўтамабіля m , радыус крывізны моста R . Чаму роўны ціск, які ўтварае аўтамабіль на мост у найніжэйшым яго пункце?

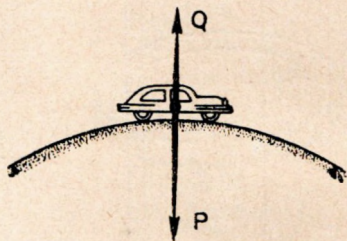
Вызначым перш за ўсё, якія сілы дзейнічаюць на аўтамабіль (рыс. 18). Такіх сіл дзве: вага аўтамабіля і сіла ціску моста на аўтамабіль. (Сілу трэння ў гэтым і ва ўсіх наступных прыкладах мы выключаем з разгляду.)

Калі аўтамабіль нерухомы, то гэтыя сілы, будучы роўнымі па велічыні і накіраванымі па адной вертыкалі, ураўнаважваюць адна другую.

Калі ж аўтамабіль рухаецца па мосце, то на яго, як і на ўсякае цела, якое рухаецца па акружнасці, дзейнічае дацэнтрабежная сіла. Што з'яўляецца крыніцай гэтай сілы? Крыніцай гэтай сілы можа быць толькі дзеянне моста на аўтамабіль. Сіла Q , з якой мост цісне на рухаючыся аўтамабіль (рыс. 18), павінна не толькі ўраўнаважваць вагу аўтамабіля P , але і прымушаць яго рухацца па акружнасці, ствараючы неабходную для гэтага дацэнтрабежную сілу F . Сіла F з'яўляецца, такім чынам, раўнадзеючай сіл P і Q . Яна заўсёды накіравана да цэнтра крывізны.



Рыс. 18. P і Q — сілы, дзеючыя на аўтамабіль, які рухаецца па ўвагнутым мосце.



Рыс. 19. P і Q — сілы, дзеючыя на аўтамабіль, які рухаецца па выпуклым мосце.

Паколькі ў становішчы, паказаным на рыс. 18, сілы P і Q накіраваны па прамой у працілеглыя бакі, то дацэнтрабежная сіла F роўна іх рознасці, г. зн.

$$F = Q - P. \quad (1)$$

З роўнасці (1) вызначыцца сіла ціску моста на аўтамабіль, г. зн. сіла Q :

$$Q = P + F. \quad (2)$$

Паколькі $F = \frac{mv^2}{R}$, то можна напісаць:

$$Q = P + \frac{mv^2}{R}. \quad (3)$$

Па трэцяму закону Ньютана, з якой сілай мост цісне на аўтамабіль, з такой жа па велічыні сілай цісне і аўтамабіль на мост, г. зн. знойдзеная сіла Q будзе роўна па велічыні шукаемай сіле ціску рухаючага аўтамабіля на мост.

Такім чынам, сіла, з якой цісне на ўвагнуты мост рухаючыся аўтамабіль (або любое іншае цела), большая за вагу аўтамабіля на велічыню дацэнтрабежнай сілы.

З формулы (3) відаць, што пры вялікіх скорасцях руху, малым радыусе крывізны моста і значных рухаючыхся масах сіла ціску на

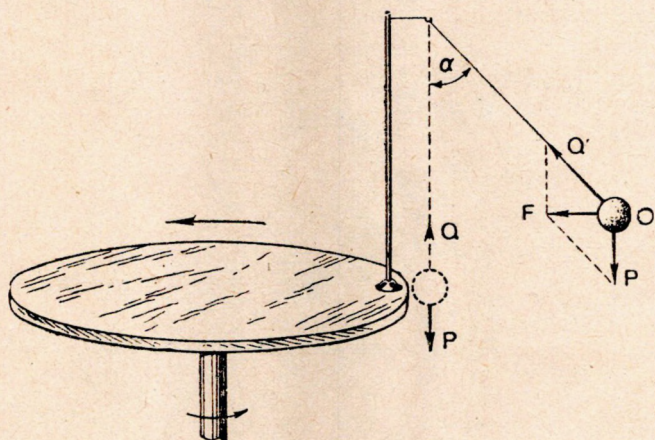
мост можа быць вельмі вялікай. Значыць, увагнутыя масты будаваць нявыгадна, бо для іх неабходны апоры павышанай трываласці.

2. Вызначым цяпер ціск, які ўтвараецца рухаючымся аўтамабілем на выпуклы мост у яго верхнім пункце. І ў гэтым выпадку на аўтамабіль дзейнічаюць дзве сілы: сіла цяжару P і сіла ціску моста Q (рыс. 19). Раўнадзеючая гэтых сіл, сіла F , выклікае пры руху па акружнасці дацэнтрабежнае паскарэнне, г. зн. яна з'яўляецца дацэнтрабежнай сілай. Дацэнтрабежная сіла F накіравана цяпер у бок увагнутасці моста, г. зн. у той жа бок, што і сіла P ; велічыня яе, як і ў першым выпадку, роўна рознасці сіл P і Q :

$$F = P - Q.$$

Адсюль:

$$Q = P - F, \text{ або } Q = P - \frac{mv^2}{R}. \quad (1)$$



Рыс. 20. На нерухома маятнік дзейнічаюць дзве роўныя і працяглыя накіраваныя сілы P і Q . Пры вярчэнні маятніка на яго дзейнічаюць сілы P і Q' , раўнадзеючая якіх F з'яўляецца дацэнтрабежнай сілай.

З такой жа па велічыні сілай аўтамабіль цісне на мост. З роўнасці (1) відаць, што гэтая сіла меншая за вагу аўтамабіля на велічыню дацэнтрабежнай сілы.

У разабраных выпадках сілы, дзеючыя на целы, якія рухаюцца па акружнасці, былі накіраваны па адной прамой. Разгледзім зараз прыклады, калі такія сілы накіраваны пад вуглом адна да другой.

3. На рыс. 20 паказан адвес, устаноўлены на століку, які верціцца. Пры нерухомым століку нацяжэнне ніткі Q і сіла цяжару P , прыкладзеныя да шарыка адвеса, накіраваны па адной вертыкальнай прамой і ўраўнаважваюць адно другое.

Пры вярчэнні століка адвес адхіляецца ад вертыкалі. Пры гэтым сілы Q' і P , дзеючыя на шарык, ужо не ўраўнаважваюцца, паколькі яны накіраваны пад вуглом адна да другой. Велічыня раўнадзеючай F гэтых

сіл залежыць ад вугла α , на які адхіліўся адвес. Пры дадзеным вугле адхілення шарык будзе рухацца па акружнасці з дацэнтрабежным паскарэннем $a = \frac{v^2}{R}$, дзе R — адлегласць паміж цэнтрам шарыка і воссю вярчэння.

Дацэнтрабежная сіла, дзеючая на шарык, будзе роўна:

$$F = \frac{mv^2}{R}, \text{ або } F = m\omega^2 R.$$

З трохвугольніка FOP можна знайсці залежнасць паміж вуглом адхілення адвеса, вуглавой скорасцю і радыусам акружнасці:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F}{P} = \frac{m\omega^2 R}{mg} = \frac{\omega^2 R}{g}.$$

Адсюль відаць, што вугал адхілення адвеса павялічваецца з павелічэннем вуглавой скорасці.

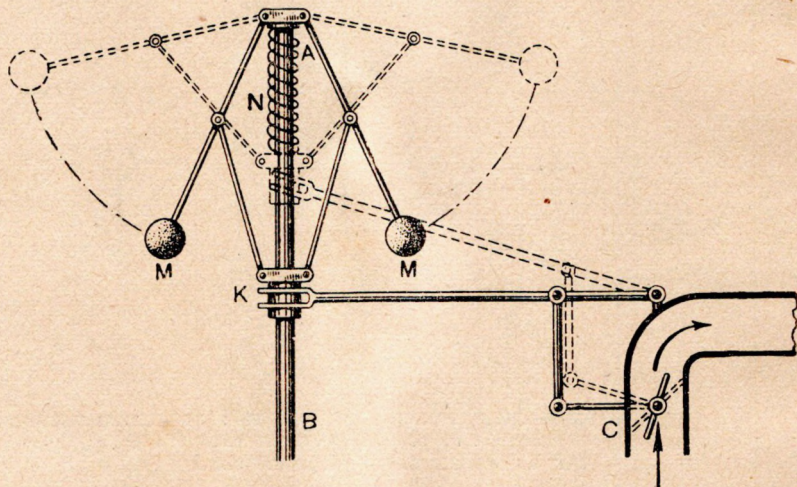


Рис. 21. Мадэль рэгулятара Уата.

4. Разгледжаная з'ява выкарыстоўваецца пры пабудове рэгулятара Уата, прыбора, які служыць для ўстанаўлення пастаяннага ліку абаротаў машыны. Яго будова паказана на рис. 21.

Вал рэгулятара AB атрымлівае вярчэнне ад машыны. Масіўныя грузы M , умацаваныя на шарнірах, пры вярчэнні адхіляюцца і паддымаюць муфту K , сціскаючы адначасова спружыну N . Муфта K злучана рычагам з засланкай C , рэгулюючай падачу пары ў цыліндры машыны. Калі лік абаротаў машыны вышэйшы за норму, муфта K паддымаецца і засланка C памяншае доступ пары ў цыліндры. Пры памяншэнні ж абаротаў машыны муфта, наадварот, апускаецца, і засланка C павялічвае паступленне пары ў машыну. Усякае змя-

ненне ліку абаротаў вала машыны цягне за сабой змяненне колькасці пары, якая паступае ў цыліндр машыны. Дзякуючы гэтаму вал машыны верціцца з пастаянным лікам абаротаў.

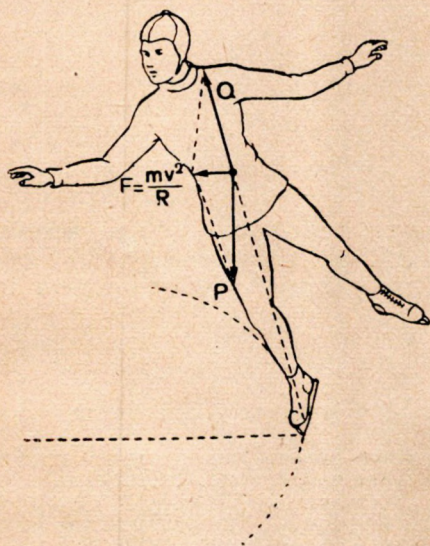
Падобныя рэгулятары ў цяперашні час устаўляюцца ў паравых машынах, у паравых турбінах і вадзяных рухавіках.

5. Разгледзім рух канькабежца на закругленні шляху.

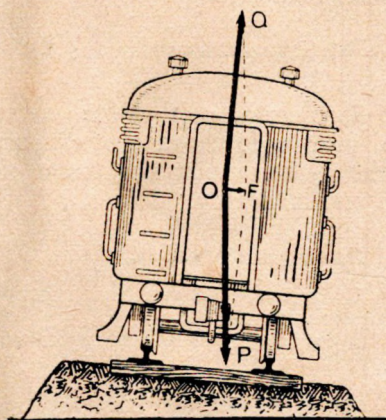
Пры руху на прамалінейным участку шляху сіла цяжару і сіла ціску з боку лёду, дзеючыя на канькабежца па адной вертыкалі, ураўнаважваюць адна другую.

Рух на закругленні адбываецца пад дзеяннем дацэнтрабежнай сілы. Каб стварыць гэтую сілу, канькабежац нахіляецца ўнутр закруглення (рыс. 22). Пры гэтым яго вага P і сіла Q ціску лёду на яго ўжо не ўраўнаважваюць адна другую. Раўнадзеючая гэтых сіл F накіравана ўнутр акружнасці, яна і з'яўляецца шукаемай дацэнтрабежнай сілай:

$$F = \frac{mv^2}{R}.$$



Рыс. 22. На закругленнях канькабежац нахіляецца да цэнтра акружнасці. Сіла цяжару P і сіла ціску Q з боку лёду даюць раўнадзеючую F , якая абумоўлівае дацэнтрабежнае паскарэнне.



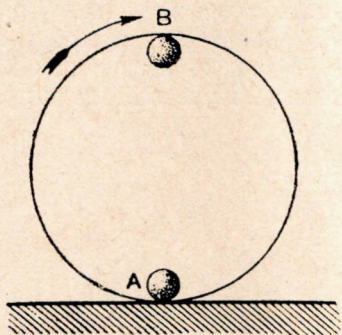
Рыс. 23. Нахіл чыгуначнага пуні на закругленні. Сіла цяжару вагона P і сіла ціску Q на яго з боку рээк даюць раўнадзеючую F , якая абумоўлівае дацэнтрабежнае паскарэнне.

Вугал нахілу корпуса канькабежца да гарызонтальнай плоскасці залежыць ад скорасці v і радыуса закруглення шляху R . Канькабежцы добра ведаюць, што чым большая скорасць і меншы радыус закруглення, тым мацней трэба нахіліць корпус унутр круга.

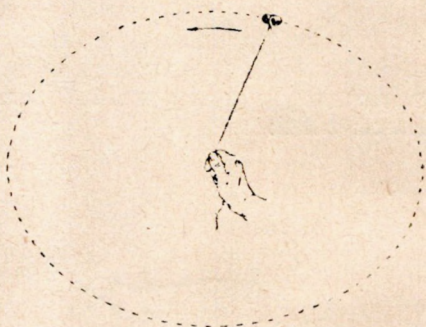
Аналагічныя з'явы маюць месца пры руху на закругленні веласіпедыста або бегуна. Ва ўсіх гэтых выпадках нахіл ствараецца самім рухаючымся чалавекам.

6. Пры руху поезда на закругленнях пуці нахіл ствараецца спецыяльнай пабудовай пуці: знадворная рэйка прыўзнямаецца адносна ўнутранай, г. зн. рэйкі на закругленні нахілены ў бок цэнтра акружнасці (рыс. 23).

На вагон у гэтым выпадку дзейнічаюць сілы P і Q , раўнадзейная якіх F і выклікае дацэнтрабежнае паскарэнне.



Рыс. 24. Да практыкавання 1, § 8.



Рыс. 25. Да практыкавання 2, § 8.

Зразумела, што нахіл чыгуначнага пуці павінен быць разлічан на некаторую сярэднюю скорасць. Значнае перавышэнне гэтай скорасці выкліча моцны бакавы ціск на рэйку, што можа прывесці да крушэння поезда.

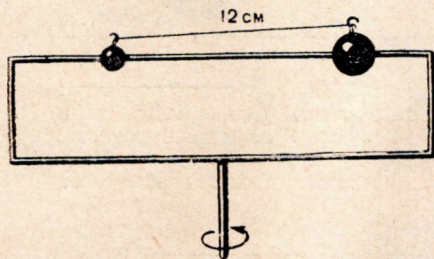
Практыкаванне 3.

1. Укажыце напрамак паскарэння рухаючагася цела ў становішчах A і B , паказаных на рыс. 24.

2. На рыс. 25 паказана рука, якая верціць камень, прывязаны да вярёўкі.

Укажыце, якія сілы дзейнічаюць на камень, на вярёўку, на руку, і пакажыце іх вектарамі. Калі ў становішчы, дадзеным на рысунку, вярёўка абарвецца, то як будзе рухацца камень?

3. На рыс. 26 паказан прыбор, складзены са стрыжня, на якому могуць слізгаць два шарыкі: маса аднаго ў 2 разы большая за масу другога. Абодва шарыкі звязаны ніткаю так, што цэнтры цяжару іх размешчаны адзін ад другога на адлегласці 12 см. Увесь прыбор прыводзіцца ў вярчэнне вакол вертыкальнай восі. Разлічыць, на якой адлегласці ад восі вярчэння павінны быць размешчаны шарыкі, каб пры



Рыс. 26. Да практыкавання 3, § 8.

вярчэнні прыбора яны заставаліся на месцы, не слізгалі па стрыжню.

4. Вилічыць, з якой найменшай скорасцю павінен рухацца велосіпедыст у верхнім пункце «мёртвай пятлі» (рыс. 27), каб не ўпасці ўніз. Радыус пятлі 8 м. Чаму роўна найменшая вышыня, з якой ён павінен пачаць рух, не працуючы педалямі?

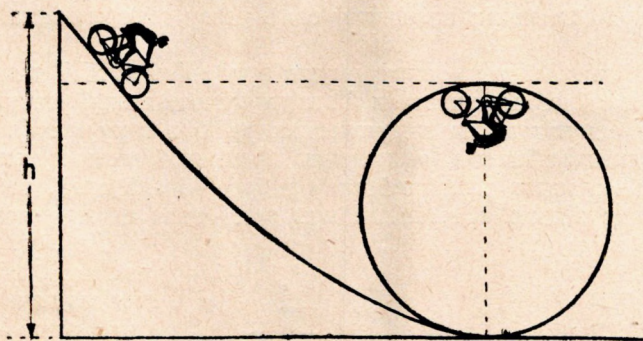


Рис. 27. Да практыкавання 4, § 8.

5. Калі на вярхоўцы прывязаць маленькае вядзерца з вадою, то можна гэтак вядзерца вярцець па кругу і вада з яго не выльецца. Зрабіце вядзерца з бляшанкі і прарабіце такі дослед. Пастарайцеся растлумачыць яго.

9. Трэці закон Ньютана ў прымяненні да руху цела па акружнасці.

Пры разглядзе руху цела па акружнасці мы звярталі ўвагу толькі на тую сілу, якая дзейнічае на рухаючаеся цела. Так, напрыклад, у адным з разгледжаных намі выпадкаў (§ 7) на шарык, што рухаўся па акружнасці, дзейнічала пругкая сіла расцягнутай (дэфармаванай) спружыны (рыс. 15).

Але згодна з трэцім законам Ньютана дзеянне спружыны на шарык павінна выклікаць роўнае і працілеглае накіраванае дзеянне шарыка на спружыну.

Такім чынам, пры руху шарыка па акружнасці адна сіла прыкладзена да шарыка (гэта дацэнтрабежная сіла), другая сіла, роўная па велічыні дацэнтрабежнай, прыкладзена да спружыны; гэтая сіла называецца адцэнтрабежнай.

Паколькі дацэнтрабежная і адцэнтрабежная сілы прыкладзены да розных цел, то ўраўнаважыць адна другую яны не могуць. Рис. 28 тлумачыць гэта: тут F —дацэнтрабежная сіла, яна прыкладзена да шарыка; Q —адцэнтрабежная сіла, яна прыкладзена да ніткі, а праз яе да цэнтра вярчэння шарыка (напрыклад, да рукі).

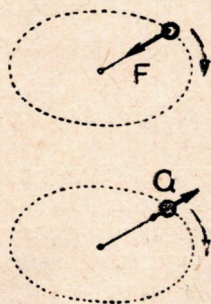


Рис. 28. Дацэнтрабежная сіла F прыкладзена да шарыка, а адцэнтрабежная сіла Q прыкладзена да ніткі, а праз яе да цэнтра вярчэння шарыка (напрыклад, да рукі).

Мы ведаем, што калі якое-небудзь цела дзейнічае на другое з некарай сілай, то абодва яны дэфармуюцца. Значыць, у выпадку

руху шарыка па акружнасці дэфармуецца не толькі спружына (або нітка), але і шарык.

Гэта адносіцца да ўсіх выпадкаў руху цел па акружнасці. Так, напрыклад, пры руху трамвая на закругленні дэфармуюцца рэйкі, і яны ціснуць на колы; апошнія ў сваю чаргу дэфармуюцца і ціснуць на рэйкі.

Устаноўлена, што на закругленнях пуці рэйкі хутчэй зношваюцца, чым на прамалінейных участках. Гэта тлумачыцца наяўнасцю бакавога ціску, які адчуваюць на закругленнях рэйкі з боку колаў.

10. Адцэнтрабежныя механізмы. Адцэнтрабежныя механізмы — гэта агульная назва разнастайных прыбораў і апаратаў, работа якіх заснавана на з'явах, назіраемых пры руху цела па акружнасці.

Да ліку такіх механізмаў належыць і разгледжаны ўжо намі рэгулятар Уата. Разгледзім яшчэ некаторыя з іх.

а) Адцэнтрабежныя насосы. Схематычны паказ адцэнтрабежнага насоса дадзены на рыс. 29. Унутры пустога корпуса *A* знаходзіцца дыск *C* з кантамі (крыльчатка), які прыводзіцца ў хуткае вярчэнне рухавіком пры дапамозе ременя *E*. Насос перад запускам запаўняецца вадой. Пры

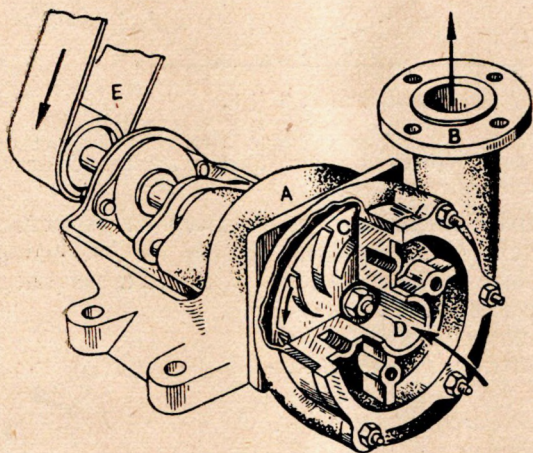


Рис. 29. Будава адцэнтрабежнага насоса.

вярчэнні крыльчаткі пачынае вярцецца і вада, якая змяшчаецца ў корпусе насоса. Паколькі сілы сцяплення паміж частачкамі вады недастатковыя, каб утрымаць іх на кругавых траекторыях, то гэтыя частачкі па інерцыі адлятаюць па датычных у вертыкальную трубу *B*. У корпусе каля крыльчаткі ствараецца паніжаны ціск. Атмасферным ціскам узамен выходзячай з корпуса вады па трубе, злучанай з адтулінай *D*, падаюцца новыя порцыі вады. На рыс. 29 стрэлкамі паказаны напрамкі вярчэння кола і рух частчак вады.

У адрозненне ад поршневых насосаў адцэнтрабежныя насосы з'яўляюцца насосамі бесперапыннага дзеяння. К. к. дз. такіх насосаў значна вышэй поршневых насосаў, бо пры іх рабоце адсутнічаюць страты энергіі, звязаныя са зваротна-паступальным рухам поршня ў цыліндры.

Адцэнтрабежныя насосы бываюць самых разнастайных размераў — ад маленькіх насосаў, якія ёсць у сістэме ахаладжэння аўтамабіля, да магутных насосаў, устаноўленых на земснарадах, што перакач-

ваюць сумесь вады і гравію, выконваючы гіганцкую земляную работу.

б) Адэнтэрабежная сушыльная машына. Адэнтэрабежная сушыльная машына знаходзіць шырокае прымяненне ў пральнях. Прынцып яе дзеяння дэманструецца на прыборы, паказаным на рыс. 30. Мокрая бялізна закладваецца ў рашэцісты барабан, які верціцца. Пры вялікай скорасці вярчэння сіла сцягвання паміж кроплямі вады і тканінай, якая з'яўляецца ў дадзеным выпадку адэнтэрабежнай сілай, недастаткова для таго, каб утрымаць гэтыя кроплі на акружнасцях. Кроплі вады адрываюцца ад тканіны і праз рашотку вылятаюць з барабана, і тканіна такім чынам высушваецца.

Сілы, узнікаючыя пры вярчэнні цела, не заўсёды прыносяць карысць, яны могуць і шкодзіць. Напрыклад, пры вялікіх скорасцях вярчэння можа адбыцца разрыв маховых колаў. Расцягнутыя пры вярчэнні спіцы кола могуць не ўтрымаць на акружнасці часткі вобода: калі расцяжэнне перавысіць дапушчальную мяжу, адбудзецца аварыя — разрыв кола.

11. Вярчальны рух цвёрдых цел. Прасцейшымі рухамі цвёрдага цела з'яўляюцца паступальны і вярчальны рухі. З паступальным рухам мы пазнаёміліся ў першай частцы курса.

Вярчальны рух цвёрдых цел вельмі распаўсюджан у прыродзе і тэхніцы. Прыкладамі такога руху з'яўляюцца: рух Зямлі вакол сваёй восі, рух маховых колаў і шківаў, рух абточаемага матэрыялу на такарных станках, рух патэфоннай пласцінкі і да т. п.

На рыс. 31 паказан вярчальны рух дэталі на такарным станку і паступальны рух разца; на рыс. 32 паступальна рухаецца дэталі, а разец (фрэза) верціцца.

Любы рух цвёрдага цела можа быць паказан як вынік паступальнага і вярчальнага рухаў. Асабліва добра гэта відаць на прыкладзе вярчальнага руху. Болт, напрыклад, укручваючыся ў гайку, рухаецца паступальна і адначасова верціцца. Свёрдзел пры рабоце (рыс. 33) таксама адначасова верціцца і рухаецца паступальна. Кола фурманкі, верцячыся вакол восі, адначасова разам з фурманкай рухаецца паступальна. Такіх прыкладаў можна прывесці колькі хочаце.

Возьмем кардонны дыск з нарысаванымі на ім кружочкамі на розных адлегласцях ад цэнтра (рыс. 34а) і прывядзём яго ў хуткае вярчэнне — мы ўбачым рад акружнасцей розных радыусаў (рыс. 34б). Гэты дослед паказвае, што пры вярчальным руху цела розныя яго пункты рухаюцца па акружнасцях: цэнтры гэтых акружнасцей ляжаць

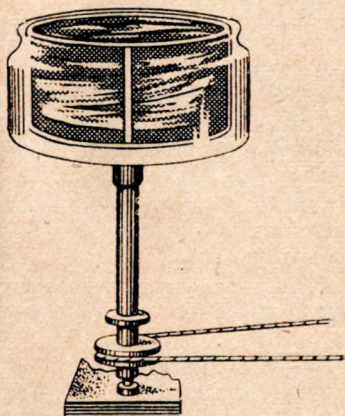
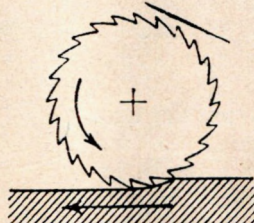
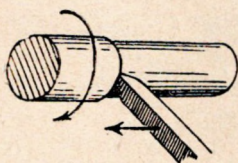


Рис. 30. Мадэль адэнтэрабежнай сушыльнай машыны.

на прамой, якая называецца воссю вярчэння. Вугал павароту радыусаў акружнасцей пунктаў за дадзены прамежак часу для ўсіх пунктаў цела аднолькавы. Таму вуглом павароту радыуса акружнасці аднаго якога-небудзь пункта цела за дадзены прамежак часу можна характарызаваць рух усіх пунктаў цела, г. зн. вярчэнне цела ў цэлым. Але вугал павароту ў 1 сек лікава ровен вуглавой скорасці. Значыць, **вуглавая скорасць для ўсіх пунктаў цела, якое верціцца, адна і тая ж.**

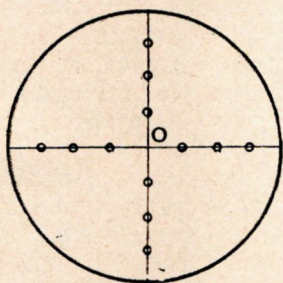


Рыс. 31. Вярчальны рух дэталі на такарным станку і паступальны рух разца.

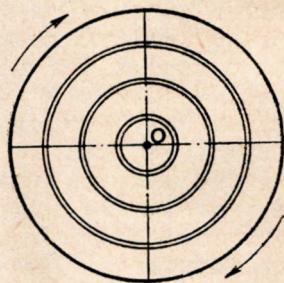
Рыс. 32. Дэталі рухаюцца справа налева паступальна, а разец (фрэза) верціцца.

Рыс. 33. Свердзел пры рабоце верціцца і рухаецца паступальна.

З рыс. 35 відаць, што пры павароце кола на вугал φ розныя пункты кола: A, A_1, A_2 —апісваюць розныя па даўжыні дугі: AB, A_1B_1, A_2B_2 ; чым пункт далей ад восі вярчэння, тым апісваемая ім дуга большая, тым большая лінейная скорасць. Такім чынам, **пры вярчэнні цела розныя яго пункты рухаюцца з аднолькавай вуглавой скорасцю, але з рознымі лінейнымі скорасцямі.**



Рыс. 34а. Уздоўж дыямэтраў дыска нанесены невялікія кружочки.



Рыс. 34б. Пры вярчэнні дыска замест кружочкаў мы бачым акружнасці, па якіх рухаюцца гэтыя кружочки.

Формула, якая выражае сувязь паміж вуглавой і лінейнай скорасцямі, была ўжо дадзена ў § 5.

12 Тахометр. Вымярэнне вуглавой скорасці верцячагася цела (верцячыхся частак машын, колаў, валаў і інш.) робяць з дапамо-

гай спецыяльнага прыбора — тахометра¹. Тахометры бываюць розных тыпаў. На рис. 36 паказана схема будовы так званага адцэнтра-бежнага тахометра. Калывавы груз m , які можа паварочвацца вакол восі a , утрымліваецца ў нахільным становішчы спіральнай пружынай b .

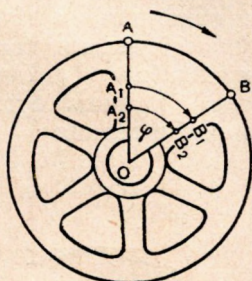


Рис. 35. Пры павароце кола на вугал φ пункты кола A, A_1, A_2 апісваюць розныя па даўжыні дугі AB, A_1B_1, A_2B_2 .

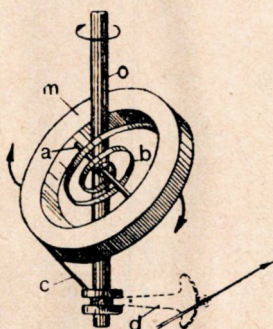


Рис. 36. Схема будовы тахометра.

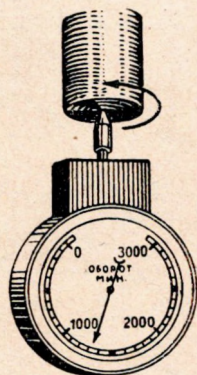


Рис. 37. Знадворны выгляд тахометра.

Вось a замацавана на галоўным вале O . Апошні злучаецца з валам, абароты якога трэба імкнецца размясціць вала O , сціскаючы пружыну b . Кольца будзе тым бліжэй да гэтага становішча, чым большая скорасць вярчэння вала. Перамяшчэнне кольца t пры дапамозе цягі c перадаецца спецыяльнаму прыстасаванню, злучанаму з сектарам d , які і верціць стрэлку ўказальніка скорасці. Кожнаму ліку абаротаў будзе адпавядаць пэўнае становішча кольца t , а значыць, і становішча стрэлкі па шкале. На рис. 37 паказан знадворны выгляд тахометра.

на галоўным вале O . Апошні злучаецца з валам, вымераць. Пры вярчэнні вала O кольца t ў плоскасці, перпендыкулярнай галоўнаму

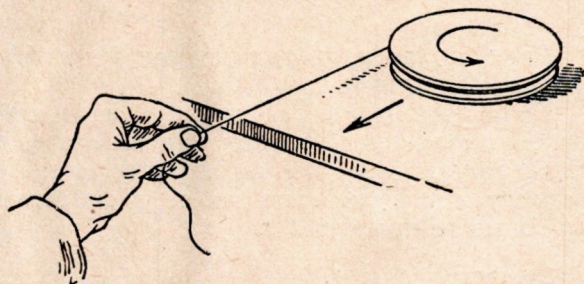


Рис. 38. Пацягнуўшы за нітку, мы прымусім дыск не толькі вярцецца, але і перамяшчацца.

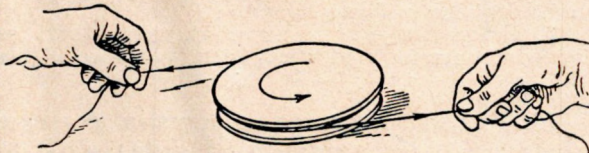
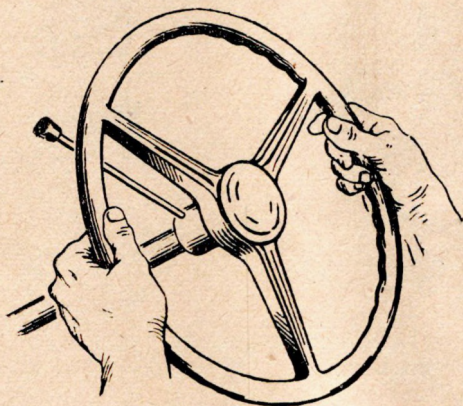


Рис. 39. Пры дзеянні двух роўных, паралельных і працілеглых накіраваных сіл (пары сіл) дыск верціцца, не перамяшчаючыся.

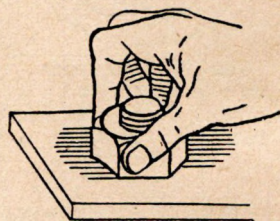
¹ Тахометр—ад грэч. слоў: тахіс—быстры, хуткі; метрo—мераю.

13. Сілы, дзеючыя на цвёрдае цела, якое верціцца вакол восі. Зробім наступны дослед. Наматаем на дыск нітку і пацягнем яе (рыс. 38). На дыск будучь дзейнічаць дзве розныя сілы: сіла нацяжэння ніткі і сіла трэння дыска аб стол. Пад дзеяннем гэтых сіл дыск будзе вярцецца і адначасова перамяшчацца.

Калі ж наматаць на дыск дзве ніткі так, як паказана на рыс. 39, і пацягнуць за ніткі ў працілеглыя бакі, прыклаўшы роўныя сілы, то дыск будзе толькі вярцецца.



Рыс. 40. Дзеянне рук вадзіцеля на рулявое кола стварае пару сіл.



Рыс. 41. Пальцы, якія закручваюць гайку, ствараюць пару сіл.

Дзве роўныя, паралельныя і працілегла накіраваныя сілы называюцца парай сіл.

Такім чынам, цела пад дзеяннем пары сіл толькі верціцца. Вярчэнне цела пад дзеяннем пары сіл шырока прымяняецца ў практыцы. Напрыклад, дзеянне рук вадзіцеля на рулявое кола (рыс. 40) стварае пару сіл; зусім гэтак жа пару сіл ствараюць пальцы, якія закручваюць гайку (рыс. 41).

Практыкаванне 4.

1. Радзус акружнасці, па якой рухаецца канец секунднай стрэлкі, 0,8 см, минутнай 2 см, гадзіннай 1,5 см. Знайсці лінейныя і вуглавя скорасці стрэлак.
2. Вядучае кола паравоза дыяметрам 1,6 м робіць 120 абаротаў у мінуту. З якой скорасцю рухаецца паравоз?
3. Знайсці лінейную і вуглавую скорасці пункта зямной паверхні на шыраце Масквы пры сутачным вярчэнні Зямлі вакол восі. Лічыць радыус Зямлі роўным 6400 км.

14. Перадача вярчэння ад рухавіка да машыны-прылады. Машыны падзяляюцца на рухавікі і машыны-прылады. Рухавікамі, напрыклад, з'яўляюцца паравая машына, паравая турбіна, гідратурбіна, электрухавік і інш. Да машын-прылад належаць станкі і машыны, якія вырабляюць розныя вырабы, напрыклад такарны станок, ткацкі станок, прадзільная машына і інш.

Для работы станка необходима, каб вярчэнне ад вала рухавіка перадавалася на вал станка. Такая перадача руху ажыццяўляецца рознымі спосабамі. Часцей за ўсё для гэтага ўжываюцца наступныя тры спосабы перадач: раменная, фрыкцыйная і зубчастая.

Мы разгледзім найбольш просты выпадак гэтых перадач, калі валы рухавіка і станка ўзаемна паралельны.

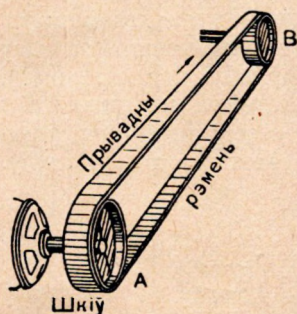


Рис. 42а. Раменная перадача: А—вядучы шкіў. В—вядзёны шкіў. Абодва шківы верцяцца ў адзін бок.

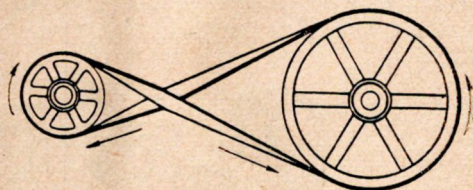


Рис. 42б. Пры перакрываючых рэменьях шківы верцяцца ў процілеглыя бакі.

станка вядзёным (рис. 42а). Калі дыяметры шківаў не аднолькавыя, то, паколькі скорасці на акружнасцях аднаго і другога шківа пры адсутнасці слізгання роўны, лікі іх абаротаў будуць розныя.

Няхай D_1 —дыяметр вядучага шківа і ён робіць n_1 абаротаў у секунду, а D_2 —дыяметр вядзёнага шківа і n_2 —лік яго абаротаў, v —скорасць на акружнасцях абодвух шківаў.

Тады:

$$v = \pi D_1 n_1 \text{ і } v = \pi D_2 n_2.$$

Адсюль:

$$n_1 = \frac{v}{\pi D_1} \quad (2)$$

Падзяліўшы роўнасць (2) на (1), атрымаем:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{D_1}{D_2}. \quad (3)$$

Лікі абаротаў шківаў адваротна прапарцыянальны іх дыяметрам.

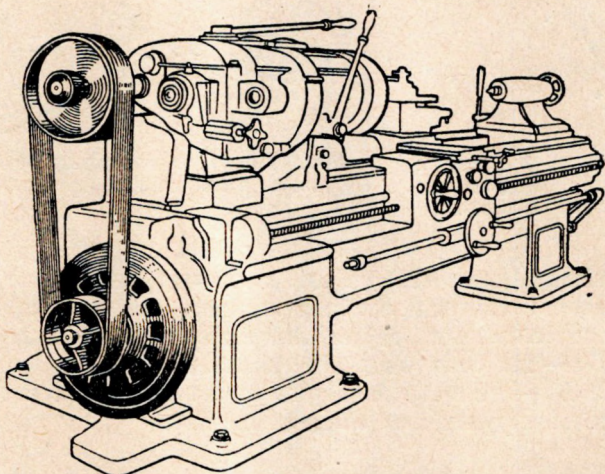
Лік $\frac{n_2}{n_1}$ называецца перадачным лікам.

З роўнасці (3) вынікае, што лік абаротаў вала станка тым большы, чым меншы дыяметр яго шківа.

Вядзёны шкіў прыводзіцца ў рух дзякуючы сілам трэння паміж рэменем і шківам. Раменная перадача працуе добра, калі адсутнічае слізганне (буксаванне) рэменя па вобладу шківа. Слізганне ў асноўным залежыць ад нацяжэння рэменя і ад вугла ахопу. Вуг-

лом ахопу называецца цэнтральны вугал, што сцягвае дугу, на якой ляжыць рэмень на шкiве. Чым большы перадатчны лік, тым меншы вугал ахопу вядзёнага шкiва і тым большае слізганне рэменя аб шкiў. У практыцы лічыцца нявыгаднай перадача з перадатчным лікам, большым 5 або меншым $1/5$. Роля трэння ў выпадку раменнай перадачы ілюструецца наступным доследам.

Перакінем вяроўку цераз круглую і гладкую перакладзіну. На адным канцы падвесім груз, а да другога прымацуем дынамометр. Для ўтрымання груза нам спатрэбіцца сіла, крыху меншая за вагу груза (на велічыню сілы трэння паміж вяроўкай і перакладзінай). Абкруціўшы адзін раз вяроўку вакол перакладзіны, мы павялічым даўжыню дугі, ахопліваемай вяроўкай. Сіла, неабходная для ўтрымання груза ў гэтым выпадку, будзе намнога меншая за вагу груза.



Рыс. 43. Раменная перадача ад электрарухавіка на вал такарнага станка (на рысунку электрарухавік і шкiў выдзелены).

Абодва шкiвы на рыс. 42а верцяцца ў адзін бок па гадзіннікавай стрэлцы. Раменнай перадачай можна ажыццявіць вярчэнне вядзёнага шкiва ў бок, працілеглы вядучаму. Для гэтага дастаткова скрыжавашь рэмень, як паказана на рыс. 42б. На рыс. 43 паказана раменная перадача ад электрарухавіка на вал такарнага станка.

16. Фрыкцыйная перадача. У выпадку фрыкцыйнай перадачы два колы прыціснуты адно да другога з некаторай сілай (рыс. 44а) Пры вярчэнні аднаго кола, напрыклад, па гадзіннікавай стрэлцы, другое кола дзякуючы трэнню прыходзіць таксама ў вярчэнне і рухаецца супраць гадзіннікавай стрэлкі. Такая перадача існуе, напрыклад, у швейнай машыне паміж колам і шпулькаматалкай (рыс. 44б), паміж тахометрам і валам матора пры вымярэнні ліку абаротаў

Наогул фрыкцыйная перадача прымяняецца пры невялікіх магутнасцях. Як вядома, пры адной і той жа скорасці магутнасць прапарцыянальна велічыні дзеючай сілы. Сіла ж, якая дзейнічае на вядзёнае

фрыкцыйнае кола, залежыць ад сілы трэння паміж абодвума коламі. Але сіла трэння залежыць ад сілы ціску.

Значыць, пры вялікай магутнасці абодва колы павінны быць прыціснуты адно да другога з вельмі вялікаю сілаю, з прычыны чаго вал, на якім насаджана кола, можа выгнуцца.

17. Зубчастая перадача. Перадача зубчастымі коламі, або шасцернямі, знаходзіць самае шырокае прымяненне ў тэхніцы. Так, напрыклад, пры дапамозе зубчастых колаў ажыц-

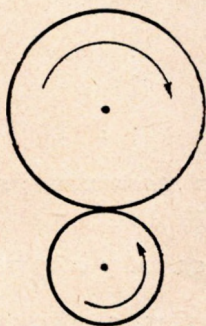


Рис. 44а. Схема фрыкцыйнай перадачы.

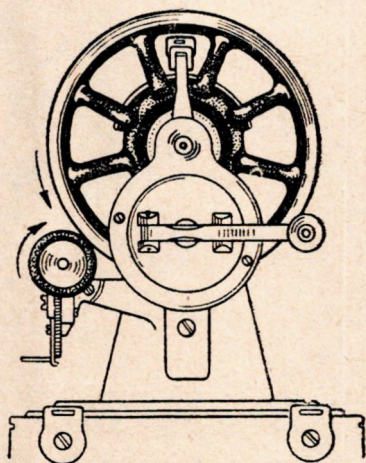


Рис. 44б. Фрыкцыйная перадача паміж коламі швейнай машыны і шпулькаматалкай.

цяўляецца перадача ад рухавіка да вядучых колаў у аўтамабілі, трактары і трамваі. Пры дапамозе зубчастых колаў перадаецца рух ад рухавіка да гравнога вінта паражода. Зубчастыя колы прымяняюцца ў многіх станках для перадачы руху ад рухавіка да станка і г. д. На рис. 45 паказана прымяненне зубчастых колаў у ручной лябёдке.

З дапамогай шасцерняў можна вярчальны рух пераўтварыць у паступальны, як гэта паказана на рис. 46. На гэтым рысунку паказана спрошчаная схема аднаго з найбольш прымяняльных механізмаў стругальнага станка. Рух ад шківа *D* (які прыводзіцца ў вярчэнне рэменем) перадаецца пры дапамозе валаў і сістэмы шасцерняў, змешчаных на гэтых валах, зубчастай рэйцы *R*. Зубчастая рэйка рухаецца паступальна ў напрамку, указаным на рысунку апэранай стрэлкай. Разам з рэйкай рухаецца і стол станка (не паказан на

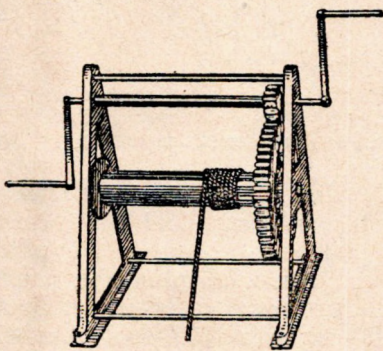


Рис. 45. Лябёдка.

рысунку), з якім рэйка змацавана. Калі рэйка дойдзе да канца, асобым прыстасаваннем перакрываючы рэмень пераводзіцца на шкіў D_1 . Рэйка пры гэтым атрымае зваротны ход (халасты) у напрамку, абазначаным простаю стрэлкай.

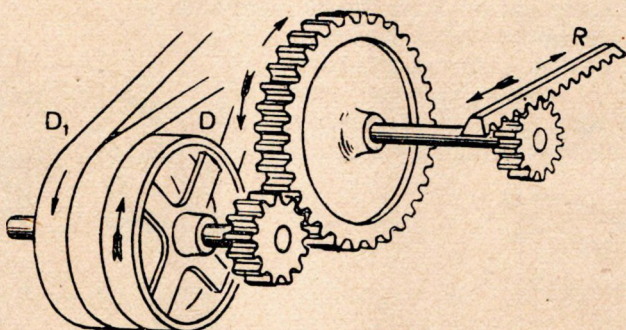


Рис. 46. Спрощаная схема перадачнага механізма для надання руху сталу падоўжна-стругальнага станка.

Лік абаротаў вядзёнага кола залежыць ад ліку абаротаў вядучага і ліку зубцоў на тым і другім коле.

Няхай адна шасцярня мае z_1 зубцоў і робіць n_1 абаротаў у секунду, другая ж, счэпленая з ёй, шасцярня мае z_2 зубцоў і робіць n_2 абаротаў (рыс. 47).

У першай шасцярні за 1 секунду праз пункт счэплення пройдучы $z_1 n_1$ зубцоў, а ў другой шасцярні — $z_2 n_2$. Паколькі лікі прайшоўшых зубцоў на абедзвюх шасцярнях роўны, то:

$$z_1 n_1 = z_2 n_2,$$

адкуль:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1},$$

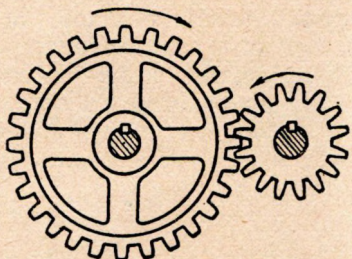


Рис. 47. Да вываду суадносін паміж лікам абаротаў і лікам зубцоў счэпленых шасцярняў.

г. зн. **лік абаротаў кожнай са счэпленых шасцярняў адваротна прапарцыянальны ліку зубцоў.**

Каб атрымаць на станку такі-ж напрамак вярчэння, як на вядучым коле, прымяняецца прамежкавая шасцярэнька.

Для атрымання патрэбных скорасцей у розных станках прымяняюцца каробкі скорасцей, а ў аўтамабілях і трактарах — каробкі перадач. Перадача ў іх ажыццяўляецца зубчастымі коламі.

На рис. 48 паказана будова каробкі перадач, а на рис. 49 схематычна паказаны тры перадачы ў аўтамабілі. Тут A — вядучы вал, B — вядзёны і C — прамежкавы вал.

Асобым механізмам можна раз'ядноўваць валы A і B . На вядучым вале A насаджана шасцярня I (на рис. 48 паказана толькі задняя

палавіна гэтай шасцярні). На прамежкавым вале *С* умацаваны шасцярні 2, 3, 4 і 7 і на вядзёным вале *В* устаноўлены слізгаючыя шасцярні 5 і 6 (карэткі).

Шасцярні 5 і 6, якія верцяцца разам з валам *В*, могуць перамяшчацца ўздоўж па гэтаму валу пры дапамозе калёвых пратоцкаў *М* (рыс. 49), у якія ўваходзяць спецыяльныя вілкі (яны абазначаны на рыс. 48 літарай *М*), што служаць для перасоўвання шасцярняў. Шасцярня 1 заўсёды счэплена з шасцярнёй 2. Шасцярня 7 і счэпленая з ёй шасцярня 8 (рыс. 48) служаць для атрымання задняга ходу.

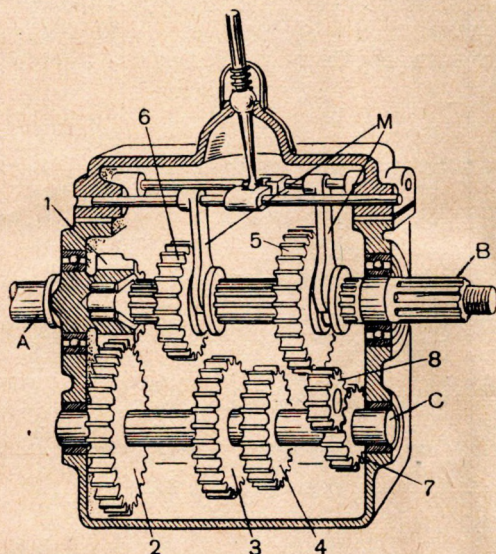


Рис. 48. Схема будовы каробкі перадач.

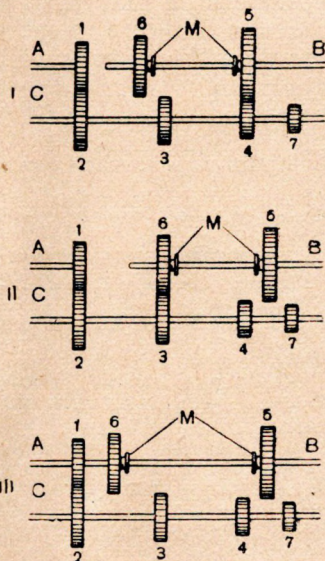


Рис. 49. Схема ўключэння шасцярняў у каробцы перадач аўтамабіля.

I перадача. Шасцярня 5 счэплена з шасцярнёй 4. Валы *В* і *А* прамога счэплення не маюць. Вядзёны вал *В* верціцца з найменшай скорасцю пры дадзеным ліку абаротаў рухавіка. Першая перадача дае найбольшае цягавое намаганне; яна прымяняецца пры зрушванні аўтамабіля з месца.

II перадача. Шасцярня 6 счэплена з шасцярнёй 3; шасцярня 5 вяртаецца на ранейшае месца. Валы *В* і *А* прамога счэплення не маюць. Скорасць вярчэння вала *В* павялічваецца. Другая перадача выкарыстоўваецца для разгону аўтамабіля і для пераадолення супраціўлення сярэдняй цяжкасці.

III перадача. Валы *А* і *В* злучаны непасрэдна. Шасцярні 5 і 6 не счэплены з шасцярнямі прамежкавага вала *С*. Вядзёны вал робіць столькі ж абаротаў, як і вядучы. Прамежкавы вал *С* верціцца ўхаластую. Пры гэтай перадачы скорасць руху аўтамабіля можа быць

найбольшай. Трэцяя перадача выкарыстоўваецца ва ўсіх выпадках руху аўтамабіля, калі не трэба пераадольваць павышаных супраціўленняў.

Задні ход аўтамабіля ажыццяўляецца пры дапамозе асобай шасцярыні 8, якая сядзіць на кароткай восі (паказана на рыс. 48). Гэтая шасцярыня заўсёды счэплена з шасцярынёй 7, размешчанай на прамежкавым вале С. Задні ход неабходны для маневравання аўтамабіля (развароту на абмежаваных па шырыні пляцоўках, пры тупіковым уездзе, руху назад і інш.). Пераключэнне перадач ажыццяўляецца пры дапамозе асобага механізма, паказанага ў верхняй частцы рыс. 48.

Счапленне служыць для часовага адключэння сілавой перадачы аўтамабіля ад вала рухавіка, што неабходна пры пераклучэнні шасцярыняў у каробцы перадач і тармажэнні аўтамабіля. Апрача таго, счапленне дае магчымасць плаўнага зрушвання аўтамабіля з месца.

Практыкаванне 5.

1. Два валы злучаны бясконцым рэменем. Вядучы вал робіць $150 \frac{об}{мін}$. На вядзёным вале, які павінен даваць $375 \frac{об}{мін}$, насаджан шкіў з дыяметрам 250 мм.

Якога дыяметра павінен быць шкіў на вядучым вале?

2. Вядучае кола мае 20 зубцоў і робіць 200 абаротаў у мінуту. Колькі зубцоў мае вядзёнае кола, калі перадатачны лік ровен $\frac{1}{4}$? Чаму ровен лік яго абаротаў?

3. Махавік паравой машыны робіць 225 абаротаў у 1 мінуту пры дыяметры 1200 мм. Акружнае намаганне складае 300 кг. Вызначыць магутнасць гэтай машыны.

4. Вызначыць акружнае намаганне на шківе электрарухавіка, дыяметр якога 500 мм, магутнасць рухавіка 60 к. с.; вуглавая скорасць шківа $975 \frac{об}{мін}$.

РАЗДЕЛ II.

ВАГАННІ І ХВАЛІ.

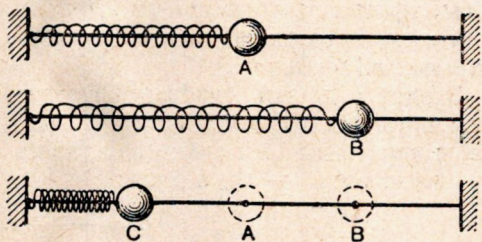
18. Перыядычны рух. Сярод разнастайных механічных рухаў, якія адбываюцца ў прыродзе і тэхніцы, сустракаюцца такія, што паўтараюцца праз роўныя прамежкі часу. Рухі такога роду называюцца перыядычнымі. Прамежак часу, праз які рух паўтараецца, называецца перыядам.

У § 11 мы ўжо разгледзелі адзін з відаў перыядычнага руху — раўнамернае вярчэнне цела. У гэтым руху пры кожным новым абароце кожны пункт цела праходзіць адны і тыя ж становішчы, прычым у той жа паслядоўнасці і з тымі ж скорасцямі.

Пазнаёмімся цяпер з такім перыядычным рухам, пры якім цела перамяшчаецца каля свайго найбольш устойлівага становішча раўнавагі, адхіляючыся ад яго то ў адзін, то ў другі бок. Такі рух называецца перыядычным ваганнем. Прыкладамі перыядычнага вагання з'яўляюцца: рух маятніка гадзінніка, дрыжанне гучальнай струны, ваганне арэляў і г. д.

Нягледзячы на вялікую разнастайнасць відаў перыядычнага руху, для характарыстыкі яго ўводзяцца некаторыя агульныя велічыні. Мы ўвядзём іх пры разглядзе ваганняў спружынага і ніцянога маятнікаў. Разам з тым устанавім і агульныя законы ваганняў.

19. Гарманічнае (просте) ваганне. Разгледзім ваганні спружынага маятніка, паказанага на рыс. 50. Ён складаецца з масіўнага шара, прасвідраванага па дыяметру і насаджанага на гарызонтальны стрыжань. Уздоўж стрыжня шар можа слізгаець з нязначным трэннем, якое мы не будзем улічваць. На стрыжань надзета сталёная спружына, адзін канец якой прымацаван да канца стрыжня, а другі — да шара.



Рыс. 50. Ваганні грузу на спружыне.

У стане раўнавагі (спакою) шар знаходзіцца ў становішчы А. Калі адцягнуць шар управа ў становішча В і затым адпусціць яго, то ён будзе рабіць ваганні каля становішча раўнавагі.

Якая прычына гэтых ваганняў? Адхіляючы шар управа, мы расцягваем спружыну; пры гэтым узнікае сіла пругкасці, якая

імкнецца вярнуць спружыну ў становішча раўнавагі. Пад дзеяннем гэтай сілы шар будзе рухацца паскорана. Дасягнуўшы становішча раўнавагі, шар не спыніцца, хоць у гэтым становішчы на яго не будзе дзейнічаць сіла (спружына не расцягнута); рухаючыся па інерцыі, ён пройдзе становішча раўнавагі і пачне сціскаць спружыну. Узнікшая сіла пругкасці будзе перашкаджаць сцісканню спружыны, з прычыны чаго шар, дасягнуўшы некаторага становішча C , спыніцца. Затым пад дзеяннем сілы пругкасці сціснутай спружыны шар будзе паскорана рухацца ўправа; па інерцыі ён зноў пройдзе становішча раўнавагі і зноў апынецца ў B , зрабіўшы такім чынам адно поўнае ваганне. Далей усё будзе паўтарацца.

Такім чынам, **прычынамі ваганняў цяжкага шара на спружыне з'яўляюцца сіла пругкасці, якая ўзнікае пры расцяжэнні і сцісканні спружыны, і інерцыя шара.**

Вымярэнні паказваюць, што пры павелічэнні зрушэння вагаючагася цела сіла пругкасці спружыны ўзрастае прапарцыянальна зрушэнню.

Значыць, калі зрушыць шар на адлегласць x ад становішча раўнавагі, то велічыня сілы F , якая вяртае яго ў гэтае становішча, вызначыцца з роўнасці:

$$F = kx, \quad (1)$$

дзе k — каэфіцыент прапарцыянальнасці — пастаянная для дадзенай спружыны велічыня, лікава роўная сіле, якая расцягвае спружыну на адзінку даўжыні.

Заўважым, што сіла F заўсёды накіравана да становішча раўнавагі, зрушэнне ж x адлічваецца ад становішча раўнавагі, г. зн. накіравана ў бок, процілеглы сіле. Каб адлюстравач гэта ў формуле, трэба правую частку роўнасці (1) узяць са знакам мінус:

$$F = -kx. \quad (2)$$

Перыядычныя ваганні, якія адбываюцца пад дзеяннем сілы, прапарцыянальнай зрушэнню і накіраванай да становішча раўнавагі, называюцца гарманічнымі (або простымі) ваганнямі.

Згодна з другім законам Ньютана, $F = ma$, дзе a — паскарэнне руху цела пад дзеяннем сілы F . Калі ў формулу (2), якая вызначае гарманічнае ваганне, падставіць замест F здабытак ma , то атрымаем: $ma = -kx$, адкуль:

$$a = -\frac{k}{m}x.$$

Атрыманае выражэнне для паскарэння дазваляе вызначыць гарманічнае ваганне яшчэ наступным чынам:

Пры гарманічным ваганні паскарэнне заўсёды прама прапарцыянальна велічыні зрушэння і процілегла яму накіравана.

Пругкія ваганні, з якімі мы пазнаёміліся на прыкладзе спружынага маятніка, з'яўляюцца надзвычай пашыраным і важным відам

ваганняў. Да ліку іх належаць, напрыклад, ваганні пад дзеяннем нагрузак частак машын, будаўнічых бэлек, рысораў; да іх жа належаць гукавыя ваганні.

20. Частата і амплітуда вагання. Перыяд вагання. Увядзём цяпер некаторыя велічыні, якія характарызуюць гарманічнае ваганне.

Найбольшае зрушэнне вагаючагася пункта ад становішча раўнавагі называецца амплітудай вагання (А). На рыс. 50 $AB = AC = A$.

Лік ваганняў, зробленых за 1 сек, называецца частатой гарманічнага вагання.

Час, на працягу якога адбываецца адно поўнае ваганне, называецца перыядам.

За адзінку частаты ў фізіцы прынят герц¹ (у гонар нямецкага вучонага Герца, які адкрыў электрамагнітныя хвалі). Герц — гэта такая частата, пры якой адбываецца адно ваганне ў секунду.

$$1 \text{ кілагерц (кгц)} = 1000 \text{ гц.}$$

$$1 \text{ мегагерц (мгц)} = 1\,000\,000 \text{ гц} = 1000 \text{ кгц}^2.$$

Устанавім суадносіны паміж перыядам ваганняў і частатой. Няхай цела робіць за 1 секунду 10 ваганняў (частата ваганняў роўна 10 гц).

Час, за які адбываецца адно ваганне, будзе ровен $\frac{1}{10}$ сек. Гэта і будзе перыяд дадзенага вагання.

Наогул, калі абазначыць працягласць перыяду праз T , а частату вагання праз f , то можна напісаць, што

$$f = \frac{1}{T} \text{ або } T = \frac{1}{f}.$$

Мы бачым, што сувязь паміж частатой і перыядам вагання такая ж, як і паміж лікам абаротаў і перыядам абарачэння ў выпадку раўнамернага руху па акружнасці (гл. § 4).

Практыкаванне 6.

1. Апішыце характар руху вагаючагася шара на гарызантальна размешчанай спружыне (рыс. 50), запоўніўшы наступную табліцу:

№№ п/п	Рух цела	Як мяняецца велічыня сілы, што рухае шар	Як мяняецца велічыня ско- расці руху шара	Як мяняецца велічыня паска- рэння руху шара
1	Ад A да B			
2	» B » A			
3	» A » C			
4	» C » A			

2. Як накіравана паскарэнне шара ў становішчах B і C ?

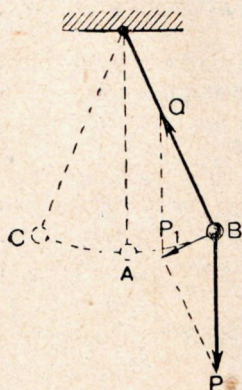
3. У якіх становішчах скорасць вагаючагася шара на спружыне найбольшая? У якіх найменшая? Гэтае ж пытанне рашыць адносна паскарэння.

¹ У тэхніцы гэтую адзінку часам называюць цыклам.

² Прыстаўка мега азначае мільён, кіло — тысяча.

21. Ваганні пад дзеяннем сілы цяжару. У параграфе 19 было разгледжана ваганне sprужыннага маятніка, але маятнікам можа быць любое цела, якое падвешана так, што яго цэнтр цяжару знаходзіцца ніжэй пункта падвесу. Вельмі зручным для многіх нашых доследаў маятнікам можа быць металічны шарык, які падвешан на нітцы.

Выведзем такі маятнік са становішча раўнавагі A (рыс. 51) і адпусцім яго — ён будзе вагацца. Разгледзім прычыну гэтых ваганняў.



Рыс. 51. Сіла P_1 , якая вяртае маятнік да становішча раўнавагі, з'яўляецца раўнадзейчай сіл P і Q .

Калі маятнік знаходзіцца ў становішчы раўнавагі, сіла цяжару, дзеючая на цела, ураўнаважана нацяжэннем ніткі. У адхіленым жа становішчы B сіла цяжару P і сіла нацяжэння ніткі Q дзейнічаюць на цела пад вуглом адна да другой.

Раўнадзейчай гэтых дзвюх сіл будзе сіла P_1 . З рыс. 51 відаць, што сіла P_1 заўсёды накіравана да становішча раўнавагі; велічыня яе будзе тым большая, чым больш адхілен маятнік ад становішча раўнавагі. Гэта лёгка правесці, пабудоваўшы паралелаграм сіл для некалькіх становішчаў маятніка. Сіла P_1 вяртае маятнік да становішча раўнавагі, абумоўліваючы яго ваганні.

Калі маятнік рухаецца ад становішча раўнавагі ўправа, сіла P_1 запавольвае яго рух тым мацней, чым далей ён адхіляецца. Калі ж маятнік пачынае зваротны рух да становішча раўнавагі, сіла P_1 пачынае адыгрываць ролю паскараючай сілы.

Маятнік не спыніцца ў становішчы раўнавагі, а па інерцыі будзе адхіляцца ўлева. Пры гэтым на яго пачне дзейнічаць сіла P_1 , якая расце з павелічэннем адхілення маятніка і накіравана таксама да становішча раўнавагі. Рух маятніка будзе запавольвацца; у пункце C ён спыніцца і затым зноў пачне рухацца паскорана ўправа; па інерцыі зноў пройдзе становішча раўнавагі A і вернецца ў B , зрабіўшы, такім чынам, адно поўнае ваганне. Далей усё будзе паўтарацца.

Мы бачылі, што велічыня сілы, якая вяртае маятнік у становішча раўнавагі, залежыць ад вугла адхілення маятніка ад становішча раўнавагі. Устаноўім цяпер гэтую залежнасць матэматычна.

Дапусцім, што зрушэнне маятніка x ад становішча раўнавагі (рыс. 52) настолькі нязначнае, што дуга, якую ён апісвае пры руху, практычна можа быць прынята за прамую лінію. Начэрцім паралелаграм сіл для становішча грузу ў B .

З рыс. 52 відаць, што $P_1 = P \sin \alpha$ (1), дзе α — вугал адхілення маятніка ад становішча раўнавагі.

Абазначым даўжыню маятніка праз l ; тады $OB = OA = l$. Калі вугал α малы, то для трохвугольніка AOB можна напісаць:

$$\frac{x}{l} = \sin \alpha.$$

Падстаўляючы гэтае значэнне для $\sin \alpha$ у роўнасць (1), атрымаем:

$$P_1 = \frac{P}{l} x.$$

Паколькі P і l не змяняюцца, а сіла P_1 па напрамку заўсёды працілегла зрушэнню, то можна напісаць:

$$P_1 = -kx, \text{ дзе } k = \frac{P}{l}.$$

Адсюль відаць, што **ваганні маятніка адбываюцца пад дзеяннем сілы, прапарцыянальнай зрушэнню маятніка і накіраванай да становішча яго раўнавагі.**

Але ў гэтым заключаецца ўмова ажыццяўлення гарманічных ваганняў. Такім чынам, **пры малых амплітудах ваганні маятніка пад дзеяннем сілы цяжару з'яўляюцца гарманічнымі, або простымі, ваганнямі.**

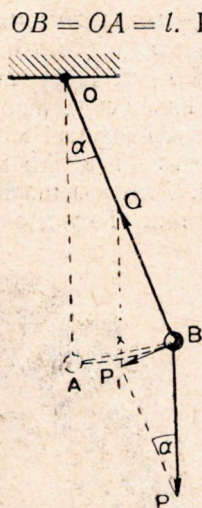


Рис. 52. Да вываду формулы матэматычнага маятніка.

Практыкаванне 7.

1. Апішыце характар руху маятніка (рис. 51), запоўніўшы наступную табліцу:

№№ п/п	Рухі маятніка	Як мяняецца велічыня сілы, што рухае маятнік	Як мяняецца велічыня скорасці руху маятніка	Як мяняецца велічыня паскарэння руху маятніка
1	Ад B да A			
2	» A » C			
3	» C » A			
4	» A » B			

Як накіравана паскарэнне руху маятніка ў пунктах B і C?

У якіх становішчах маятніка скорасць яго руху найбольшая? У якіх найменшая?

У якіх становішчах маятніка паскарэнне яго руху найбольшае?

2. Пад дзеяннем якой сілы маятнік вагою 100 P пры адхіленні яго ад становішча раўнавагі на 45° пачынае вяртацца да становішча раўнавагі?

3. Перыяд вагання зубіла пнеўматычнага малатка ровен 0,02 сек. Чаму роўна частата ваганняў? Ваганні зубіла лічыць гарманічнымі.

4. Пры руху поезда кола шатунна-крывавышпнага механізма робіць 1200 абаротаў за 5 мінут. Вызначыць частату ваганняў поршня ў цыліндры паравоза, лічачы іх гарманічнымі.

22. Законы вагання матэматычнага маятніка. Колькасныя суадносіны, якія характарызуюць вагальны рух, прасцей за ўсё ўстанавіць для так званага матэматычнага маятніка.

Матэматычным маятнікам называюць матэрыяльны пункт, які падвешан на тонкай, нерасцяжнай і бязважкай ніці. Натуральна, што на практыцы мы можам толькі з той або іншай ступенню дакладнасці набліжацца да гэтага ідэальнага выпадку. Рэальнай мадэллю матэматычнага маятніка ў нашых доследах служыць невялікі металічны шарык, які падвешан на тонкай пругкай ніці. Размеры шарыка павінны быць малыя ў параўнанні з даўжынёй ніці. Гэта дае магчымасць лічыць, што ўся яго маса сканцэнтравана ў адным пункце — цэнтры цяжару шарыка.



Гюйгенс Хрысціян (1629—1695) — вялікі галандскі фізік і матэматык. Ён упершыню вырашыў рад важнейшых задач механікі, адкрыў закон вагання маятніка, усталяваў формулу дацэнтрабежнай сілы. Гюйгенсу належыць вынаходства маятнікавых гадзіннікаў (1657). Ён развіў тэорыю светлавых з'яў, якая не страціла свайго значэння і ў цяперашні час.

Падвесім да стойкі адзін з такіх маятнікаў даўжынёю каля 1 м і, адвёшы яго ад становішча раўнавагі на невялікі вугал, вызначым, за які час ён зробіць, напрыклад, 50 ваганняў.

Паменшым вугал адхілення (пачатковую амплітуду) і зноў вызначым час, на працягу якога шарык зробіць 50 ваганняў.

Аказваецца, што і пры паменшанай амплітудзе шарыку спатрэбіўся для 50 ваганняў той жа час, што і пры большай амплітудзе. Мяняючы ў невялікіх межах амплітуду ваганняў маятніка, можна выявіць, што **пэрыяд вагання маятніка пры невялікіх амплітудах не залежыць ад амплітуды вагання.**

Гэтая ўласцівасць маятніка, адкрытая ўпершыню Галілеем, называецца **ізахроннасцю**¹. Яна, як мы ўбачым

далей (§ 27), дала магчымасць прымяніць маятнік у гадзінніках.

Падвесім да стойкі на доўгіх нітках два аднолькавыя шарыкі², зробленыя з розных матэрыялаў, напрыклад сталёны і свінцовы, так, каб даўжыні атрыманых маятнікаў былі аднолькавыя.

Адхілім абодва маятнікі ад становішча раўнавагі на адзін і той жа вугал. Яны вагаюцца **сінхронна**, г. зн. перыяды іх вагання аднолькавыя, хаця масы маятнікаў розныя. Мяняючы як заўгодна

¹ Ізахроннасць — ад грэч.: іза — аднолькавы, хронас — час.

² Аднолькавыя па размеру шарыкі пры руху будуць адчуваць аднолькавыя супраціўленні паветра.

масы маятникаў, можна пераканацца, што **перыяд вагання матэматычнага маятника не залежыць ад масы маятника.**

Праробім яшчэ адзін дослед, падвесіўшы да стойкі некалькі аднолькавых шарыкаў на нітках рознай даўжыні. Прывеўшы ў ваганне маятнікі, заўважым, што перыяды ваганняў іх будуць розныя: чым меншая даўжыня маятника, тым меншы перыяд яго ваганняў.

Галандскі вучоны Гюйгенс, даследуючы законы вагання маятника, устанавіў, што **перыяд вагання матэматычнага маятника прама прапарцыянальны караню квадратнаму з даўжыні маятника і адваротна прапарцыянальны караню квадратнаму з паскарэння сілы цяжару:**

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

дзе l — даўжыня маятника, g — паскарэнне сілы цяжару.

Маятник з'яўляецца найбольш простым, зручным і дакладным прыборам для вызначэння паскарэння сілы цяжару.

Наяўнасць у якім-небудзь месцы Зямлі залежаў карысных выкапняў, якія адрозніваюцца па шчыльнасці ад акружаючых іх парод, адбіваецца на змяненні велічыні паскарэння g у гэтым месцы. Сапраўды, паскарэнне g абумоўлена сілай цягання, а апошняя будзе тым большая, чым большая прыцягвальная маса Зямлі. На гэтым грунтуецца шырокае выкарыстанне маятника ў прыборах, якія прымяняюцца ў геалагічных разведках. Па вымярэнню перыяду вагання маятника T у дадзеным месцы вылічваюць велічыню g . Калі яна будзе, напрыклад, больш за нармальную, то, значыць, у гэтым месцы сканцэнтраваны пароды большай шчыльнасці і, наадварот, у месцах, дзе залягаюць менш шчыльныя пароды, паскарэнне g будзе меншае, чым нармальнае.

Практыкаванне 8.

1. Знайсці даўжыню матэматычнага маятника, перыяд вагання якога на шыраце Масквы ровен 1 сек $\left(g = 981,56 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2} \right)$.

2. Чаму павінна быць роўна паскарэнне сілы цяжару, каб маятник даўжынёю 1 м вагаўся з перыядам у 2 сек?

3. Вызначыць даўжыню маятника з перыядам вагання ў 1 сек на Луне $\left(g_L = 160 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2} \right)$, на Марсе $\left(g_M = 360 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2} \right)$.

23. Графічны запіс вагальнага руху. Графічны запіс руху шырока прымяняецца пры вывучэнні вагальных працэсаў, якія хутка адбываюцца, таму што дае магчымасць вывучыць кожную стадыю такіх працэсаў.

Найбольш прастай і нагляднай формай запісу з'яўляецца запіс ваганняў маятника пяском на паперы або на фанеры пры дапамозе прыбора, паказанага на рыс. 53а.

Шкляная лейка, запоўненая пяском, можа рабіць ваганні ў адной плоскасці. Пад лейкай знаходзіцца фанера з нанесенай пасярэдзіне «нулявой» лініяй OO_1 .

Калі фанера будзе нерухомай, то лейка пры адхіленнях ад становішча раўнавагі ўправа будзе высыпаць пясок па адзін бок ад нулявой лініі, а пры адхіленнях улева — па другі. Пры раўнамерным руху фанеры ўлева насыпаемая лейкай пясчаная дарожка будзе перасякаць нулявую лінію OO_1 праз аднолькавыя прамежкі часу, роўныя палавіне перыяду $\left(\frac{T}{2}\right)$.

Калі ўявіць сабе, што ў кожны момант часу лейка высыпае пэўную порцыю пяску, то гэтыя пясчаныя порцыі будуць фіксаваць на фанеры становішча маятніка ў кожны момант часу. Найкарацейшая адлегласць ад любой адвольна ўзятай пясчанай порцыі да «нулявой лініі» будзе роўна зрушэнню маятніка x у пэўнае імгненне. Максімальная велічыня зрушэння вызначыць нам амплітуду вагання (A). Бесперапыннае высыпанне пясчаных порцый створыць бесперапынную пясчаную дарожку, якая графічна паказвае змяненне зрушэння маятніка ў залежнасці ад часу (рыс. 53б).

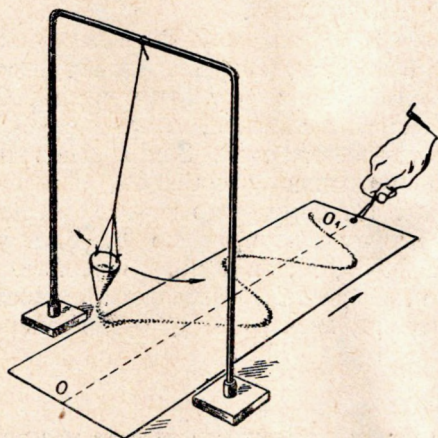


Рис. 53а. Устаноўка для запісу вагання маятніка.

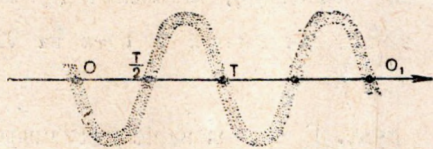


Рис. 53б. Графік вагання маятніка.

Для дадзенага выпадку пясчаны графік руху маятніка будзе мець выгляд сінусоіды.

Паколькі графічна гарманічнае ваганне паказваецца сінусоідай, то яго часта называюць яшчэ сінусаідальным ваганнем.

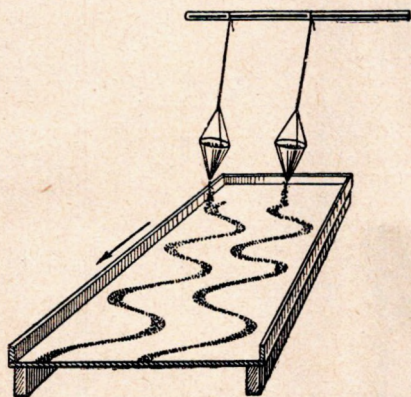
24. Фаза ваганняў. Зрушэнне фаз. Калі два маятнікі, рухаючыся ў адзін і той жа бок, у некаторы момант адначасова праходзяць становішча раўнавагі, то прынята гаварыць, што ў гэты момант яны знаходзяцца ў аднолькавых **фазах** x^1 . Гэтая аднолькавасць фаз будзе мець месца бесперапынна і далей пры ўмове, калі частоты ваганняў маятнікаў аднолькавыя. Такі выпадак паказан на рыс. 54а. Сінусаідальныя крывыя, якія з'яўляюцца графічным запісам вагальных рухаў абодвух маятнікаў, пры накладанні супадаюць адна з другой.

Магчымы выпадак, калі маятнікі, дасягаючы становішча раўнавагі або іншага, аднолькава выбранага для кожнага з іх пункта, рухаюцца ў працілеглыя бакі. У гэтым выпадку маятнікі знаходзяцца

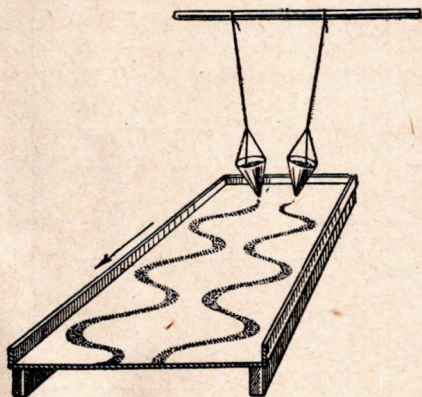
¹ Фаза (ад грэч. фазіс) — пэўны момант, перыяд у развіцці якой-небудзь з'явы.

ў працілеглых фазах. Сінусаїдальныя крывыя, якія паказваюць такі выпадак вагання (рыс. 54б), ссунуты адна адносна другой у часе на палавіну перыяду.

Фаза ёсць адна з велічынь, якія характарызуюць вагальны рух. Устаноўім меру гэтай велічыні. Для гэтага звязам вагальны рух з раўнамерным рухам пункта па акружнасці. На рыс. 55 літарамі O, O_1, O_2 і г. д. абазначаны розныя становішчы невялікага шарыка, які рухаецца раўнамерна па акружнасці, а літарамі P_0, P_1, P_2 і г. д.— становішчы яго праекцыі на плоскасць MN . Праекцыя шарыка вагаецца каля сярэдняга становішча P_0 , адхіляючыся ад яго



Рыс. 54а. Маятнікі вагаюцца ў аднолькавых фазах.



Рыс. 54б. Маятнікі вагаюцца ў працілеглых фазах.

ўверх і ўніз. Дакажам, што гэты рух з'яўляецца гарманічным ваганнем. Для якога-небудзь становішча праекцыі P_1 велічыня адхілення:

$$x = P_0P_1 = BO_1.$$

Амплітуда вагання (A) роўна найбольшай велічыні адхілення:

$$A = P_0P_2 = OO_2 = OO_1.$$

З трохвугольніка OBO_1 вынікае, што $BO_1 = OO_1 \sin \varphi$ або:

$$x = A \sin \varphi. \quad (1)$$

У атрыманае выражэнне ўваходзіць велічыня φ . У кругавым руху φ ёсць вугал, які ўяўляе сабой вуглавое перамяшчэнне шарыка за час t , прайшоўшы з моманту выхаду яго з пачатковага (нулявога) становішча: $\varphi = \omega t$, дзе $\omega = \frac{2\pi}{T}$ — вуглавая скорасць.

Такім чынам,

$$\varphi = \frac{2\pi}{T} t.$$

У вагальным руху велічыня φ называецца фазай вагання. З атрыманай формулы відаць, што **фаза паказвае, якая доля перыяду прайшла ад моманту пачатку ваганняў.**

Ведаючы фазу вагання, па формуле (1) можна вызначыць велічыню зрушэння вагаючагася пункта і напрамак яго руху, г. зн. вызначыць становішча вагаючагася пункта ў любы момант часу:

$$x = A \sin \frac{2\pi}{T} t. \quad (1)$$

Графічна ўраўненне (1) паказваецца сіносаідай. Ураўненне (1) паказвае, што ваганне праекцыі шарыка, які раўнамерна рухаецца па акружнасці, ёсць гарманічнае ваганне.

Становішчы вагаючагася праекцыі, адзначаныя на рис. 55 літарамі P_0, P_1, P_2 і г. д., адрозніваюцца адно ад другога па фазе на $\frac{1}{8}T$, або на $\frac{\pi}{4}$.

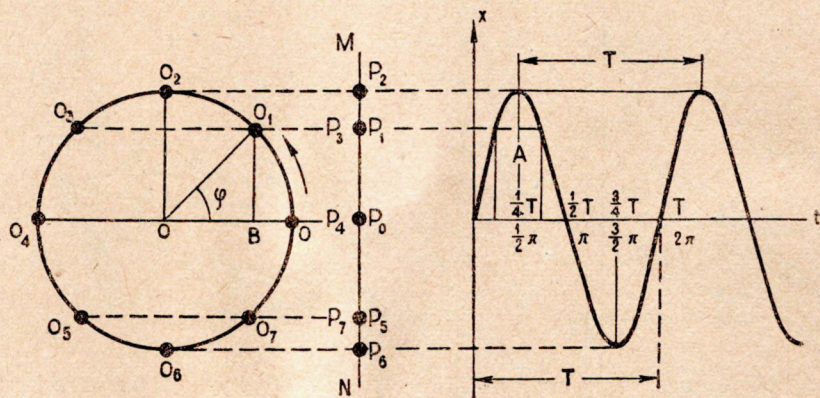


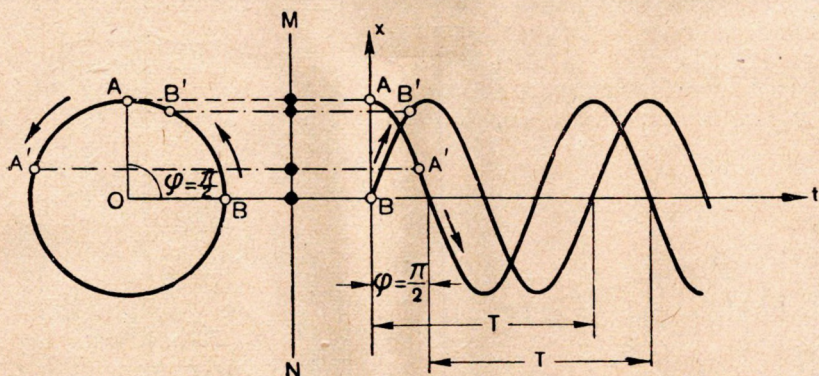
Рис. 55. Праекцыя P шарыка O , раўнамерна рухаючагася па акружнасці, на плоскасць MN утварае гарманічнае ваганне, якое графічна паказваецца сіносаідай.

Адкладаючы па гарызантальнай восі час (у долях перыяду), які прайшоў з пачатку вагання, або фазы вагаючагася пункта, а па вертыкальнай восі зрушэнні x у кожны момант часу, атрымаем графік сіносаідальнага вагальнага руху (правая частка рис. 55).

На рис. 56 два шарыкі A і B рухаюцца раўнамерна па акружнасці з аднолькавай скорасцю. Іх праекцыі на плоскасць MN утвараюць гарманічныя ваганні. Графічна гэтыя ваганні паказваюцца сіносаідамі, ссунутымі па фазе адна адносна другой на чвэрць перыяду ($\frac{1}{4}T$), або на $\frac{\pi}{2}$ (90°).

25. Ператварэнні энергіі пры ваганнях маятніка. Адхіляючы маятнік са становішча раўнавагі, мы выконваем работу па падняццю маятніка (рис. 51). Пры дасягненні маятнікам крайняга становішча (пункт B) павялічваецца запас патэнцыяльнай энергіі маятніка. Калі прыняць велічыню патэнцыяльнай энергіі маятніка ў пачатковым становішчы за нуль, то патэнцыяльная энергія ў крайнім адхіленым становішчы (пры адсутнасці якіх-небудзь страт) будзе роўна выкананай рабоце.

Са становішча B рухаючыся маятнік пераходзіць на ўсё больш нізкія ўзроўні, а значыць, яго патэнцыяльная энергія памяншаецца і ператвараецца ў нуль у самым ніжэйшым пункце, г. зн. у становішчы раўнавагі. Адначасова з памяншэннем патэнцыяльнай энергіі павялічваецца скорасць руху маятніка, а значыць, і яго кінетычная энергія. Максімум кінетычнай энергіі маятнік будзе мець у пункце, у якім ён мае найбольшую скорасць, г. зн. у пункце A . Паколькі мы разглядаем выпадак, калі адсутнічаюць усякія страты энергіі, то, згодна з законам захавання энергіі, кінетычная энергія маятніка



Рыс. 56. Праекцыі шарыкаў A і B на плоскасць MN утвараюць гарманічныя ваганні; сінусоіды, якія паказваюць гэтыя ваганні, ссунуты па фазе адна адносна

$$\text{другой на вугал } \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

ў момант праходжання ім становішча раўнавагі будзе роўна патэнцыяльнай энергіі яго ў крайнім становішчы. І для любога прамежкавага становішча на шляху BA сума патэнцыяльнай і кінетычнай энергіі заўсёды будзе роўна пастаяннай велічыні, роўнай патэнцыяльнай энергіі маятніка ў становішчы B .

Пры руху ў напрамку ад A да C маятнік перамяшчаецца на больш высокі ўзровень, яго патэнцыяльная энергія пры гэтым узрастае. Разам з тым памяншаюцца скорасць і кінетычная энергія маятніка. Кінетычная энергія маятніка ператвораецца ў нуль, калі ён дасягне пункта C , г. зн. таго ўзроўню, на якім ён быў у пункце B . У пунктах B і C патэнцыяльная энергія маятніка аднолькавая.

Такія ж пераўтварэнні энергіі адбываюцца пры ваганні sprужынага маятніка (рыс. 50). Толькі ў гэтым выпадку павелічэнне патэнцыяльнай энергіі пры адхіленні маятніка са становішча раўнавагі адбываецца ў працэсе работы супраць сілы пругкасці, якая імкнецца вярнуць маятнік да становішча раўнавагі.

Практыкаванне 9.

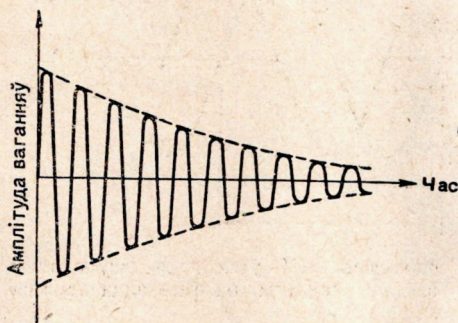
1. Колькі разоў за перыяд вагання маятніка патэнцыяльная энергія пераходзіць у кінетычную і, наадварот, кінетычная — у патэнцыяльную?

2. У якія моманты кінетычная энергія вагаючага маятніка роўна яго патэнцыяльнай энергіі?

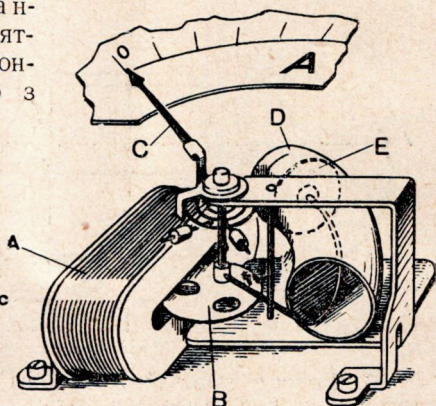
3. Вызначыць вышыню пад'ёму металічнага шара, падвешанага на нітцы, калі скорасць яго руху праз становішча раўнавагі роўна $140 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$.

4. Маятнік даўжынёю 1 м вагаецца так, што вугал найбольшага адхілення яго ровен 30° . У момант праходжання ім становішча раўнавагі нітка яго зачэплася за цвік на сярэдзіне яе даўжыні. Вызначыць найбольшы вугал адхілення пакарачанага маятніка.

26. Затухаючыя ваганні. Для таго каб маятнік стаў рабіць ваганні, неабходна надаць яму некаторы запас энергіі, напрыклад штурхануць яго або адвесці ў бок і адпусціць. Пры гэтым ваганні яго будуць адбывацца дзякуючы толькі пачатковаму запасу энергіі. Такія ваганні называюцца свабоднымі ваганнямі. Свабодныя ваганні маятніка не могуць працягвацца бясконца доўга. Вопыт паказвае, што з



Рыс. 57. Графік затухаючых ваганняў.



Рыс. 58. Схема будовы амперметра электрамагнітнай сістэмы з паветраным дэмпферам.

цягам часу амплітуда ваганняў маятніка паступова памяншаецца, г. зн. пасля кожнага хістання вышыня пад'ёму маятніка памяншаецца, і праз некаторы час яго ваганні спыняюцца. Гэтая з'ява сведчыць аб тым, што энергія маятніка паступова расходзецца на пераадоленне супраціўлення паветра, сіл трэння ў падвесе і г. д.

Такім чынам, памяншэнне запасу энергіі вагаючагася цела, звязанае з аддачай энергіі ў акружаючае асяроддзе, выклікае памяншэнне амплітуды ваганняў. Такая з'ява называецца **затуханнем ваганняў**. **Ваганні з памяншаючайся амплітудай называюцца затухаючымі.** Графік такіх ваганняў паказан на рыс. 57.

Чым большае супраціўленне асяроддзя, тым хутчэй змяншаецца амплітуда і хутчэй спыняюцца ваганні. Маятнік можа вагацца ў паветры досыць доўгі час. Той жа маятнік, атрымаўшы такі ж запас энергіі, у вадзе здолее зрабіць не больш аднаго-двух ваганняў.

Цела, якое вагаецца, расходзе энергію не толькі на работу па пераадоленню супраціўлення акружаючага асяроддзя, але і на прывядзенне ў вагальны рух гэтага асяроддзя, напрыклад паветра.

Практычна свабодныя ваганні заўсёды з'яўляюцца затухаючымі. Пры свабодных ваганнях запас энергіі надаецца цэлу толькі ў пачатку

руху, і ваганні працягваюцца толькі да таго часу, пакуль гэты запас не вычарпаецца. Каб ажыццявіць, напрыклад, незатухаючыя ваганні маятніка, трэба бесперапынна папаўняць яго энергію па меры яе расходвання.

На з'яве вялікага затухання заснавана будова асобых прыстасаванняў — дэмпфераў¹. Дэмпферы выкарыстоўваюцца ў шматлікіх вымяральных прыборах, калі патрэбна, каб стрэлка прыбора, не вагаючыся, устаўлівалася на адпаведным дзяленні шкалы. На рыс. 58 паказана схема электрамагнітнага амперметра. Невялікі жалезны дыск *B* умацаван на восі паблізу катушкі *A*. Пры прапусканні па катушцы току дыск уцягваецца ў катушку, паварочваючы стрэлку *C* і адначасова рухаючы поршань *E* ў цыліндры *D*. Пры гэтым ствараецца рознасць ціскаў паветра з абодвух бакоў поршня *E*, якая перашкаджае ўзнікненню ваганняў стрэлкі.

27. Скарыстанне маятніка ў гадзінніку. Прыкладам незатухаючых ваганняў з'яўляюцца ваганні маятніка ў гадзінніку, дзе яго энергія двойчы за перыяд папаўняецца за кошт энергіі паднятай гіры або заведзенай sprужыны.

Гадзіннік уяўляе сабой сістэму зубчастых колаў, звязаную са стрэлкамі і прыводзімую ў рух паднятай гірай або закручанай sprужынай. Для правільнага ходу гадзінніка энергія гіры або закручанай sprужыны гадзінніка павінна скарыстоўвацца невялікімі, перыядычна расходуюмымі порцыямі. Як гэта ажыццяўляецца, паказана на рыс. 59.

Маятнік звязан з дугой *m*, якая мае два зубцы па канцах. Гэтыя зубцы блізка падыходзяць да зубцоў храпавіка² *R*.

Штурхнуўшы маятнік, мы атрымаем скачкападобнае вярчэнне храпавіка, выкліканае цяжарам гіры або сілай пругкасці sprужыны. Пры кожным ваганні маятніка храпавік будзе пераскокваць на адзін зубец, падштурхоўваючы разам з тым і самы маятнік, дзякуючы чаму мы атрымаем раўнамерны ход гадзінніка: ваганні маятніка будуць незатухаючымі да таго часу, пакуль не скончыцца завод sprужыны або не апусціцца да канца гіра. Перасоўваючы ўздоўж стрыжня маятніка груз *A*, мы можам рэгуляваць частату вагання маятніка, а значыцца, і ход гадзінніка.

Маятнік да гадзінніка прымяніў упершыню Гюйгенс у 1657 г.

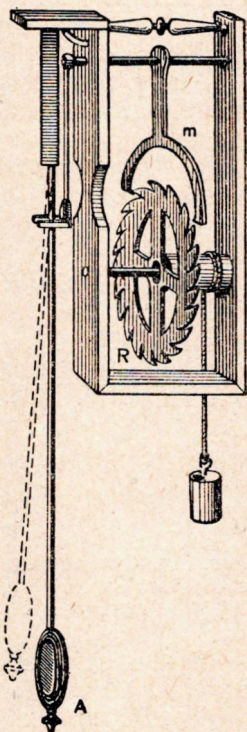


Рис. 59. Мадэль механізма насценнага гадзінніка.

¹ Дэмпфер (нямецкае слова) — прыстасаванне для заспакаення механічных ваганняў.

² Храпавік — зубчастае кола, якое можа свабодна рухацца ў адзін бок; рух кола ў другі бок затрымліваецца зубцамі дугі, звязанай з маятнікам.

Практикаванне 10.

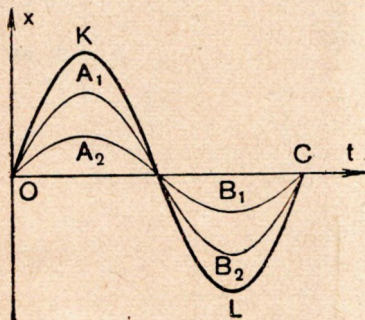
1. Як змяняецца перыяд вагання маятніка пры павышэнні тэмпературы? Як у гэтым выпадку змяняецца ход гадзінніка?

2. Разабраць перадачу і ператварэнне энергіі ў гадзінніковым механізме.

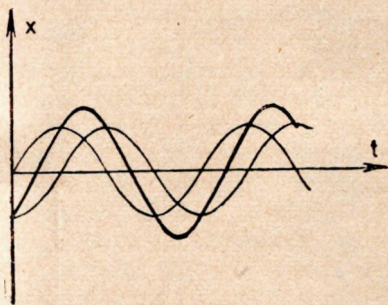
27а. Складанне гарманічных вагальных рухаў. Гарманічны вагальны рух, як было ўстаноўлена, адбываецца пад дзеяннем сілы, прапарцыянальнай велічыні зрушэння і накіраванай да становішча раўнавагі цела.

Такой сілай з'яўляецца, напрыклад, сіла пругкасці.

Разгледзім цяпер, як будзе вагацца цела, калі на яго будзе дзейнічаць не адна, а некалькі падобнага роду сіл. Кожная з дзеючых на цела сіл будзе выклікаць гарманічны вагальны рух, прычым кожны рух будзе адбывацца незалежна ад іншых, у адпаведнасці з прынцыпам незалежнасці рухаў (§ 2).



Рыс. 59а. Складанне двух гарманічных вагальных рухаў з аднолькавымі перыядамі і фазамі.



Рыс. 59б. Складанне двух гарманічных вагальных рухаў, якія адрозніваюцца па фазе.

Задача зводзіцца да знаходжання рэзультуючага гарманічнага вагальнага руху, г. зн. да складання гарманічных ваганняў.

Прасцейшы выпадак — гэта той, калі складаюцца два гарманічныя вагальныя рухі, якія адбываюцца па адной і той жа прамой з аднолькавымі перыядамі (а значыць, і з аднолькавымі частотамі) і аднолькавымі фазамі. Амплітуды ваганняў могуць быць рознымі. У дадзеным і ў некаторых іншых выпадках задача складання ваганняў вельмі проста рашаецца графічным метадам.

Няхай OA_1B_1C — сіносоіда аднаго гарманічнага руху, а сіносоіда OA_2B_2C — другога (рыс. 59а). Складзём алгебраічна для любога моманту часу ардынаты, якія выражаюць зрушэнні вагаючагася цела ў кожным з гэтых двух рухаў. Злучыўшы канцы сумарных ардынат, мы атрымаем крывую $OKLC$, якая з'яўляецца таксама сіносоідай, маючай перыяд, аднолькавы з перыядамі складаемых рухаў. Значыць, **у выніку складання двух гарманічных вагальных рухаў аднолькавай частаты, якія адбываюцца ўздоўж адной прамой, атрымліваецца таксама гарманічны вагальны рух з той жа частатой, як і ў складаючых рухаў.**

На рис. 59б тоўстай лініяй паказан графік, які атрымаўся ў выніку складання графікаў двух гарманічных ваганняў аднаго і таго ж перыяду, роўных амплітуд, але па фазе адрозніваючыхся на $\frac{\pi}{2}$, або па часу на $\frac{1}{4}T$.

Разгледзім яшчэ выпадак, калі складаюцца два гарманічныя вагальныя рухі аднолькавага перыяду, але якія адрозніваюцца адзін ад другога па фазе на π (выпадак працілеглых фаз), або па часу на $\frac{1}{2}T$. Такія рухі часткова нібы гасяць адзін другога. Калі амплітуды складаючых вагальных рухаў роўны, то цела, якое ўдзельнічае ў гэтых двух рухах, застаецца ў спакоі адносна цела адліку. На рис. 59в паказан іменна такі выпадак.

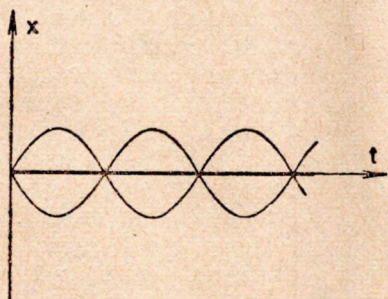


Рис. 59в. Складанне двух гарманічных вагальных рухаў з працілеглымі фазамі.

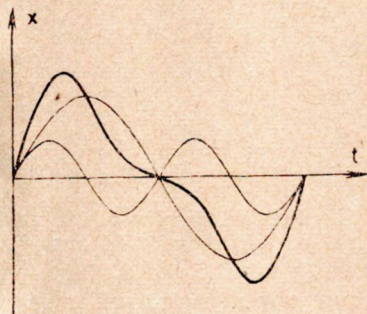


Рис. 59г. Складанне двух гарманічных вагальных рухаў з рознымі перыядамі.

Карыстаючыся апісаным графічным метадам, можна паказаць, што *пры любой рознасці фаз рэзультуючы рух, які складаецца з двух гарманічных вагальных рухаў аднолькавага перыяду, што адбываюцца па адной і той жа прамой, ёсць гарманічны вагальны рух такога ж перыяду.*

Прымяняючы графічны метад, можна скласці два гарманічныя вагальныя рухі, частоты якіх не роўныя, але кратныя адна другой.

На рис. 59г паказан графік складання двух адначасова пачаўшыхся гарманічных вагальных рухаў з рознымі амплітудамі; частоты гэтых рухаў адносяцца, як 1:2.

У выніку складання атрымліваецца не сіносоіда, а больш складаная, перыядычна паўтараючаяся крывая (яна паказана на рис. 59г тоўстай лініяй).

З гэтых прыкладаў відаць, што графік складанага перыядычнага руху будзе мець выгляд, які залежыць ад частот складваемых гарманічных вагальных рухаў, іх амплітуд і фаз.

28. Вымушаныя ваганні. Разгледжаныя намі ваганні спружыннага і ніцянога маятнікаў пачыналіся ад штуршка звонку. Пасля штуршка

цела вагалася свабодна, г. зн. на яго ўжо не дзейнічала знешняя сіла. Гэтыя ваганні, як мы бачылі, з'яўляюцца затухаючымі.

Свабодныя ваганні называюцца ўласнымі ваганнямі, а частата іх — уласнай частотой вагання.

У прыродзе і тэхніцы шырока распаўсюджан іншы тып ваганняў, калі на вагаючаеяся цела дзейнічаюць знешнія сілы, якія перыядычна змяняюцца. Разгледзім адзін з прыкладаў такога роду ваганняў.

Падвесім якое-небудзь цела і будзем разгойдваць яго, дзейнічаючы на яго сілай, велічыня і напрамак якой перыядычна мяняюцца. У гэтым

выпадку цела будзе рабіць ваганні не самастойна, не свабодна, а пад дзеяннем гэтай сілы.

Ваганні цела пад дзеяннем знешняй сілы, якая перыядычна змяняецца, называюцца вымушанымі ваганнямі.

У адрозненне ад свабодных ваганняў вымушаныя ваганні цела могуць адбывацца з любой частотой, якая вызна-

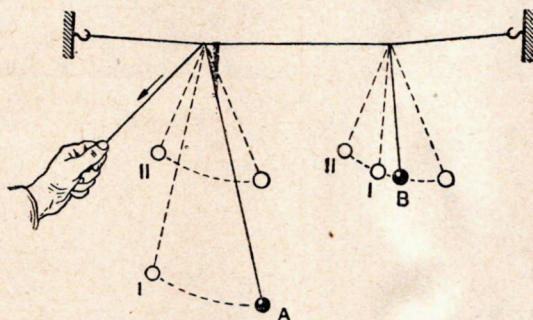


Рис. 60. Устаноўка для вывучэння рэзанансу маятнікаў.

чаецца толькі частотой змяненняў знешняй сілы.

Частата вымушаных ваганняў цела роўна частаце змянення дзеючай на цела сілы.

Пры вымушаных ваганнях энергія, якая расходуюцца на пераадоленне розных супраціўленняў, папаўняецца за кошт работы дзеючай на цела перыядычнай сілы. Таму, у адрозненне ад свабодных ваганняў, **вымушаныя ваганні з'яўляюцца незатухаючымі ваганнямі.**

29. Рэзананс. Разглядаючы ваганні маятніка, мы ўстанавілі, што магчымы два тыпы ваганняў: 1) уласныя ваганні, частата якіх вызначаецца ўласцівасцямі самога вагаючагася цела, і 2) вымушаныя ваганні, частата якіх роўна частаце змяненняў знешняй сілы, дзеючай на цела.

Выпадак, калі ўласная частата ваганняў цела супадае з частотой вымушаных ваганняў, з'яўляецца асабліва важным. Разгледзім яго на доследзе.

На рис. 60 паказана ўстаноўка, якая дазваляе назіраць вымушаныя ваганні. Да вярэвочнай расцяжкі падвешаны маятнікі А і В. Даўжыню маятніка А можна змяняць, падцягваючы рукой свабодны канец ніткі, на якой ён вісць.

Калі маятнік А знаходзіцца ў становішчы, абазначаным на рысунку лічбай 1, прывядзём яго ў ваганне. Мы заўважым, што і маятнік В прыдзе ў ваганне. Будзем цяпер змяняць даўжыню маятніка А і назіраць за маятнікам В. Адзначаючы пры розных даўжынях маят-

ніка A амплітуду маятніка B , можна заўважыць, што са змяненнем даўжыні маятніка A змяняецца амплітуда ваганняў маятніка B . Найбольшага значэння амплітуда вагання маятніка B дасягне тады, калі даўжыні абодвух маятнікаў будуць аднолькавыя.

Гэтая з'ява мае вельмі простае тлумачэнне. Усім добра вядома, што пры разгойдванні якога-небудзь падвешанага на вярхоўцы цела (напрыклад, арэляў) неабходна падштурхоўваць яго звонку хоць і з невялікай сілай, але дзеючай на цела ў такт з яго ўласнымі ваганнямі. Любы ж няўзгоднены штуршок (супраць ходу) выкліча памяншэнне амплітуды.

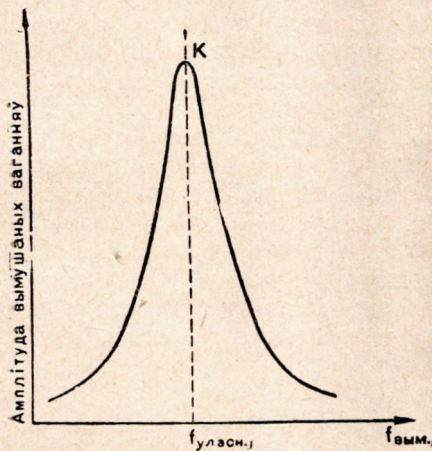


Рис. 61. Резанансавая крывая.

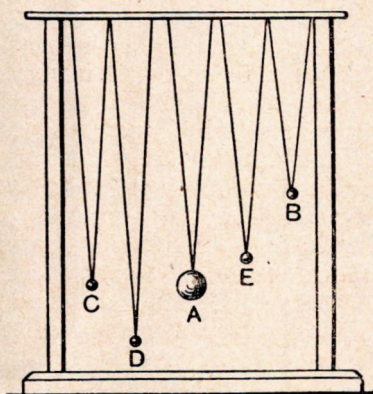


Рис. 62. Устаноўка для назірання резанансу маятнікаў.

Зусім гэтак жа працякае з'ява і ў нашым доследзе з маятнікамі. Змяняючы даўжыню маятніка A , мы тым самым змяняем частату змяненняў вымушаючай сілы, дзеючай на маятнік B . Прычынай, якая вымушае вагацца маятнік B , з'яўляюцца перыядычныя ваганні расцяжкі з частатой ваганняў маятніка A . Чым бліжэй частата змяненняў вымушаючай сілы падыходзіць да ўласнай частаты ваганняў маятніка B , тым большы лік імпульсаў сілы будзе садзейнічаць павелічэнню амплітуды маятніка B . Вымушанае ваганне маятніка B будзе мець найбольшую амплітуду тады, калі ўласная яго частата будзе роўна частаце змяненняў вымушаючай сілы, у дадзеным выпадку частаце ваганняў маятніка A (становішча II на рысунку). У гэтым выпадку гавораць аб резанансе.

Резанансам называецца з'ява рэзкага ўзрастання амплітуды вымушаных ваганняў цела, калі частата змяненняў вымушаючай сілы супадае з частатой уласных ваганняў цела.

Калі частата вымушаючых ваганняў, г. зн. частата ваганняў маятніка A , будзе ўзрастаць і далей, то амплітуда вымушаных ваганняў

маятніка B зноў будзе памяншацца і пры вельмі вялікай частаце вымушаючых ваганняў стане блізкай да нуля.

На рыс. 61 паказан графік залежнасці амплітуды вымушаных ваганняў ад частаты змяненняў вымушаючай перыядычнай сілы. На гэтым рысунку па гарызантальнай восі (восі абсцыс) адкладзены частоты вымушаных ваганняў, а па вертыкальнай восі (восі ардынаты)—адпавядаючыя ім амплітуды ваганняў цела. Калі частата вымушаных ваганняў ($f_{\text{вымуш.}}$) робіцца роўнай уласнай частаце ваганняў цела ($f_{\text{уласн.}}$), амплітуда ваганняў дасягае найбольшай велічыні. На рыс. 61 такая амплітуда абазначана ардынатай пункта K . Частату $f_{\text{вымуш.}} = f_{\text{уласн.}}$ называюць рэзанансавай частатой. Пры адхіленні частаты перыядычна змяняючайся вымушаючай сілы ад рэзанансавай частаты ўлева або ўправа ад яе амплітуда ваганняў памяншаецца.

З'яву рэзанансу наглядна можна прадэманстраваць на наступным простым доследзе. Падвесім да стойкі масіўны маятнік A (рыс. 62) і побач з ім некалькі іншых маятнікаў рознай даўжыні.

Выведзем маятнік A са становішча раўнавагі. Ваганні гэтага маятніка перададуцца стойцы, а апошнія будзе дзейнічаць з частатой, роўнай частаце маятніка A , на іншыя маятнікі. Мы ўбачым, што толькі маятнік C , даўжыня якога роўна даўжыні маятніка A , моцна разгойдаецца. Гэты маятнік знаходзіцца ў рэзанансе з маятнікам A . Маятнікі ж D і E будуць вагацца з вельмі малой амплітудай, а самы кароткі маятнік B амаль зусім не будзе вагацца; яго частата далёкая ад частаты ваганняў маятніка A .

30. Значэнне рэзанансу ў тэхніцы. З'яву рэзанансу прыходзіцца ўлічваць у тэхніцы. Разгледзім некаторыя прыклады.

З прычыны нераўнамернасці ходу ўсякая машына робіць невялікія ваганні, частата якіх роўна ліку абаротаў вала машыны ў секунду. Калі гэтая частата супадае з уласнай частатой пругкіх ваганняў, якія могуць утвараць розныя часткі машыны або апора, на якой устаноўлена машына, то наступіць рэзананс. Амплітуды гэтых вымушаных ваганняў могуць аказацца настолькі вялікімі, што адбудзецца катастрофа—разбурыцца машына або апора.

Здаралася, што з прычыны рэзанансу развальваўся на часткі самалёт у паветры, а пад дзеяннем перыядычных штуршкоў колаў поезда на стыках рэк абвальваўся чыгуначны мост.

Яркі выпадак рэзанансу меў месца ў 1907 г., калі ў зале пасяджэнняў Дзяржаўнай думы ў Таўрычаскім палацы (у Пецярбургу) абвалілася ўся тынкоўка са столі. Вінаватым у гэтай катастрофе аказаўся невялікі матор, які быў устаноўлены пад столлю і служыў для вентыляцыі.

Можна прывесці шмат прыкладаў паломак каленчатых валаў машын, грабных вінтоў у суднах, паветраных вінтоў у самалётах, якія выклікаліся з'явай рэзанансу. Ва ўсіх такіх выпадках прыходзіцца змагацца з рэзанансам.

Аднак рэзананс адыгрывае ў тэхніцы не толькі шкодную ролю. З'ява рэзанансу, як мы ўбачым далей, выкарыстоўваецца ў будове многіх прыбораў.

31. Хвалевы рух. Утварэнне папярочных хваль. У доследзе з рэзансам маятнікаў (§ 29) перадача ваганняў ад аднаго маятніка да другога адбываецца ў выніку існавання сувязі паміж імі. Ад аднаго маятніка ваганні перадаюцца перакладзіне, да якой падвешаны маятнікі, а ад перакладзіны да другіх маятнікаў.

Паколькі ва ўсякім цэле складаючыся яго частачкі звязаны паміж сабой, то ваганні адной якой-небудзь частачкі перадаюцца паступова другім частачкам. **Распаўсюджванне ваганняў у асяроддзі ўяўляе сабой хвалевы рух.**

Разгледзім прасцейшы выпадак распаўсюджвання ваганняў. Размесцім на сталё доўгі шнур або гумавую трубку. Калі адзін канец

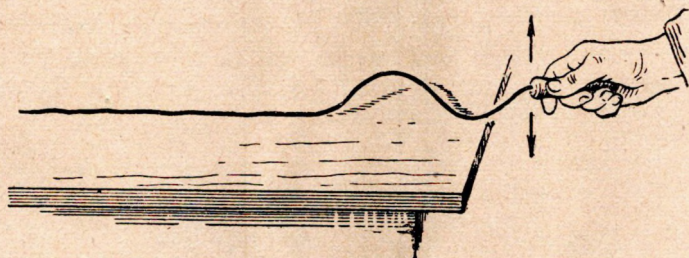


Рис. 63. Утварэнне хвалі.

шнура хутка адвесці ўверх і вярнуць назад, то ўтвораны выгін «пабяжыць» па шнуры з некаторай скорасцю. Калі рухаць канец шнура бесперапынна, прымушаючы яго рабіць ваганні, то па шнуры «пабяжыць» хваля (рис. 63).

Разгледзім раней за ўсё прычыны, якія выклікаюць перадачу вагальнага руху ад адной часткі шнура да другой, інакш кажучы—разгледзім дынаміку хвалевага руху.

Зрушэнне рукой уверх канца шнура выклікае дэфармацыю шнура ў гэтым месцы.

Выкліканыя нацяжэннем шнура сілы пругкасці цягнуць за зрушаным канцом шнура наступную бліжэйшую да яго частку. Зрушэнне гэтай другой часткі выклікае дэфармацыю ў наступнай частцы шнура і г. д.

Але часткі шнура, на якія мы яго мысленна падзялілі, уладаюць інерцыяй і таму пад дзеяннем пругкіх сіл прыходзяць у вагальны рух не ў адзін момант, а з некаторым спазненнем.

Калі канец шнура даходзіць да верху і пачынае рухацца ўніз, сумежная з ім частка шнура па інерцыі працягвае рух уверх і толькі праз некаторы час даходзіць да верху, а затым ідзе ўніз. Чым далей размешчана частка шнура ад яго канца, тым яна пазней пачынае ўтвараць вагальны рух.

Важна зразумець, што ў **хвалевым руху кожная частка шнура ўтварае такія ж вагальны рух, які мы рукой вымушаем рабіць канец шнура.** Але ваганне частачкі тым

больш спазняецца (адстае па фазе), чым далей гэтая частачка размешчана ад канца шнура.

Зразумець гэтую досыць складаную з'яву можа дапамагчы рыс. 63а. На гэтым рысунку паказаны звязаныя паміж сабой сіламі пругкасці занумараваныя частачкі, якія ўтвараюць гарманічныя ваганні каля сваіх становішчаў раўнавагі. Амплітуда і частата ваганняў ва ўсіх частачках аднолькавая.

Ваганне кожнай наступнай частачкі адбываецца з адставаннем па фазе ад вагання папярэдняй. Частачка 4 адстае ад першай на $\frac{1}{4} T$ (па фазе адстае на $\frac{\pi}{2} = 90^\circ$), частачка 7 — на $\frac{1}{2} T$ (па фазе адстае на $\pi = 180^\circ$), частачка 10 — на $\frac{3}{4} T$ (або на $\frac{3}{2} \pi = 270^\circ$), а частачка 13 адстае ад першай частачкі на цэлы перыяд (а па фазе на $2\pi = 360^\circ$), г. зн. вагаецца гэтак жа, як і частачка 1; частачка 14 вагаецца гэтак жа, як 2; частачка 15, як 3, і г. д.

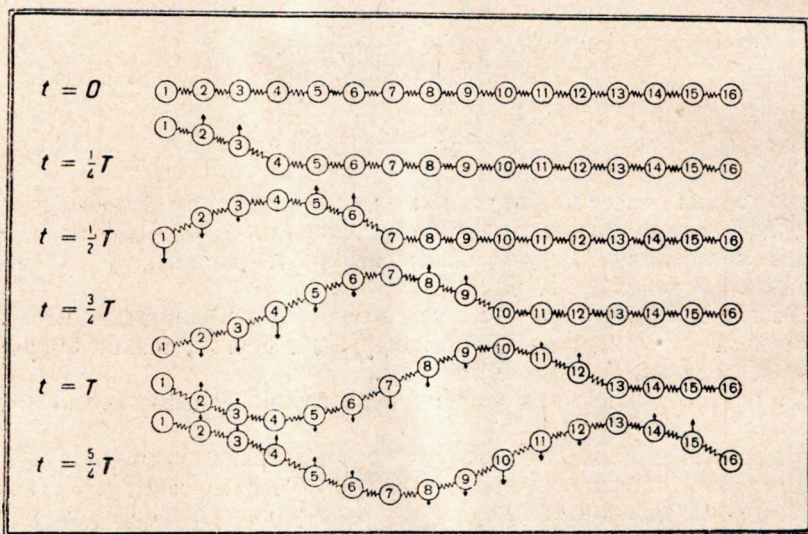


Рис. 63а. Механізм утварэння папярочнай хвалі.

На рыс. 63а стрэлачкі паказваюць напрамак скорасці вагаючайся частачкі адносна становішча раўнавагі.

За адзін перыяд вагання хвалі перамяшчаецца на адлегласць, роўную адлегласці паміж пунктамі 1 і 13, якія вагаюцца з рознасцю фаз у 360° , г. зн. аднолькава (рознасць фаз у 360° раўназначна рознасці фаз у 0°).

Адлегласць паміж бліжэйшымі пунктамі сінусаідальнай хвалі, якія вагаюцца ў аднолькавай фазе, называецца даўжынёй хвалі.

Абазначаецца даўжыня хвалі літарай λ (грэч. «ламбда»).

На рис. 63а даўжынёй хвалі будзе адлегласць паміж пунктамі 1 — 13, або паміж 2 — 14, або паміж 4 — 16.

На працягу адной даўжыні хвалі мы сустрэнем частачкі, якія вагаюцца ва ўсемагчымых фазах. Ад пачатку кожнай даўжыні хвалі фазы ваганняў паўтараюцца. Аднолькавыя фазы маюць такія пункты, якія знаходзяцца адзін ад другога на 1, 2, 3, наогул на цэлы лік даўжынь хваль. Калі ж пункты знаходзяцца адзін ад другога на $\frac{\lambda}{2}$, $3\frac{\lambda}{2}$, $5\frac{\lambda}{2}$, г. зн. на няцотны лік паўхваль (гл., напрыклад, частачкі 1 і 7 на рис. 63а), то фазы такіх двух пунктаў працілежны адна другой, г. зн. адрозніваюцца на $\pi = 180^\circ$.



Рис. 64. Хвалі на паверхні вады.

Для хвалевага руху характэрным з'яўляецца перыядычнасць у часе і перыядычнасць у прасторы. Сапраўды, кожная частачка асяроддзя робіць перыядычныя ваганні ў часе і ў той жа час у кожны момант часу ўсе частачкі размяшчаюцца па лініі, форма якой перыядычна паўтараецца ў прасторы.

Разгледжаныя намі хвалі на вярхоўцы з'яўляюцца па пярочным і хвалямі; частачкі ў гэтых хвалях утвараюць ваганні ў напрамку, перпендыкулярным распаўсюджванню хвалі.

Калі кінуць камень у сажалку, то можна бачыць, як ад месца падзення каменя па паверхні вады будуць разыходзіцца кругавыя папярочныя хвалі (рис. 64). Пры падзенні камень высяняе ваду і ў месцы яго падзення на вадзе атрымаецца ўпадзіна. Выцесненая з гэтай упадзіны вада ўтвораць каля ўпадзіны кольцападобны грэбень. Гэты грэбень зараз жа пачынае расшырацца ва ўсе бакі і ўсё далей адыходзіць ад месца падзення каменя. За першым грэбенем утворацца другі, за ім трэці і г. д. Грэбені адзін ад другога раздзелены ўпадзінамі.

Вельмі важна зразумець, што вада зусім не пераносіцца разам з хваляй. У гэтым лёгка пераканацца на доследзе. Раскідаем па паверхні вады рад паплаўкоў (коркі, кару і да т. п.). Хвалі бягуць па паверхні вады, а нашы паплаўкі застаюцца на месцы і толькі

падаюцца ўверх, пападаючы на грэбень хвалі, і апускаюцца ўніз, калі пападаюць ва ўпадзіну. Падобна гэтаму трымаюць сябе і асобныя частачкі вады: яны таксама не бягуць разам з хваляй, а толькі вагаюцца ўверх і ўніз у напрамку, перпендыкулярным к воднай паверхні, па якой рухаецца хваля.

32. Падоўжныя хвалі. Акрамя папярочных хваль, могуць быць хвалевыя рухі з ваганнямі ўздоўж таго напрамку, па якому яны распаўсюджваюцца. Хвалі такога віду называюцца падоўжнымі.

Падоўжныя хвалі могуць распаўсюджвацца як у цвёрдых, так і ў вадкіх і газападобных целах, паколькі ва ўсіх гэтых целах пры змяненні аб'ёму ўзнікаюць сілы пругкасці. Назіраць падоўжныя хвалі зручна на доўгай спіральнай sprужыне (рыс. 65). Ударам па аднаму канцу sprужыны ствараецца згущэнне віткоў, якое «бяжыць» па sprужыне. Працэс распаўсюджвання падоўжных хваль можна растлумачыць пры дапамозе рыс. 66.



Рыс. 65. Прыклад утварэння падоўжных хваль.

Няхай у нас ёсць рад пругка звязаных частачак: 1, 2, 3..., 16, якія знаходзяцца на роўных адлегласцях адна ад другой (рыс. 66).

Мы даём штуршок частачцы 1 управа ўздоўж лініі 1—16. Ад штуршка частачка прыдзе ў вагальны рух, прычым яна наблізіцца да суседняй частачкі і прывядзе яе таксама ў вагальны рух, тая перадае вагальны рух наступнай частачцы і г. д. У выніку ўсе частачкі паступова пачнуць вагацца, але не адначасова, а так, што кожная наступная частачка пачынае ваганні крыху пазней, чым папярэдняя; таму вагацца яны будуць з адным і тым жа перыядам, але з рознымі фазамі. На рыс. 66 кожны наступны радок дае становішча частачак праз $\frac{1}{4}$ перыяду вагання. Мы бачым, што ў выніку зрушэнняў вагаючыхся частачак ад іх сярэдніх становішчаў спачатку ўтвараецца згущэнне частачак, а за ім ідзе разрэджанне. На рыс. 66 пункцірнымі лініямі паказаны графікі ваганняў частачак 1, 4, 7, 10 і 13.

Графічна падоўжныя хвалі паказваюцца таксама, як і папярочныя хвалі, — у выглядзе сіносоід, прычым грэбень сіносоіды адпавядае згущэнню ў падоўжнай хвалі, а ўпадзіна — разрэджанню.

У цвёрдых целах пругкія сілы ўзнікаюць як пры змяненні іх формы, так і пры змяненні аб'ёму. Таму ў цвёрдых целах могуць распаўсюджвацца як падоўжныя, так і папярочныя хвалі.

У газах і вадкасцях пры змяненні формы сілы пругкасці не ўзнікаюць, таму папярочныя хвалі, выклікаемыя сіламі пругкасці, распаўсюджваюцца ў іх не могуць.

Прыкладам хвалевага руху ў цвёрдым целе ў вялікім маштабе з'яўляецца распаўсюджванне ваганняў у час землетрасенняў унутры зямнога шара або ўздоўж паверхневай кары Зямлі. Назіральная станцыя, размешчаная далёка ад цэнтра землетрасення, прымае перш за ўсё падоўжныя хвалі. Даследаваннямі ўстаноўлена, што пасля прыходу першай падоўжнай хвалі паяўляюцца папярочныя хвалі, скорасць распаўсюджвання якіх меншая, чым скорасць распаўсюджвання падоўжных хваль.

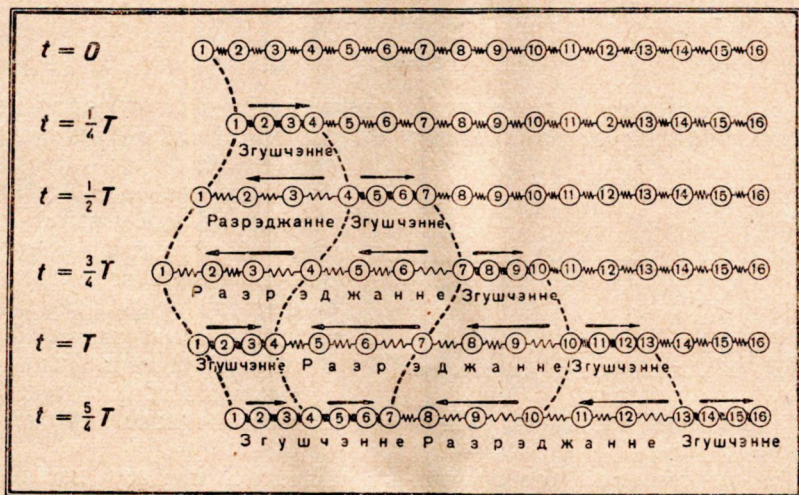


Рис. 66. Утварэнне падоўжных хваль.

Калі ведаць скорасць абодвух відаў хваль і прамежак часу паміж іх прыходам, то на аснове тэорыі (яе вывучаюць у спецыяльных вышэйшых навучальных установах) можна вызначыць адлегласць цэнтра землетрасення ад назіральнай станцыі. Прыборы, якія ўлаўліваюць ваганні, што прыходзяць ад месца землетрасення, называюцца сейсмографамі.

Пры дапамозе сейсмографу можна запісаць ваганні паверхневых слаёў Зямлі і вызначыць іх інтэнсіўнасць.

33. Даўжыня хвалі і скорасць распаўсюджвання хваль. І для падоўжных, і для папярочных хваль **даўжыня хвалі ёсць адлегласць, на якую распаўсюджваюцца ваганні ў асяроддзі за час, роўны аднаму перыяду вагання.**

На рис. 66а адлегласць KK' уяўляе сабой даўжыню папярочнай хвалі.

Даўжынёй падоўжнай хвалі будзе адлегласць паміж сярэдзінамі двух суседніх згущэнняў або разрэджанняў (рис. 65).

Ведаючы даўжыню хвалі і перыяд ваганняў, можна вызначыць скорасць распаўсюджвання ваганняў у асяроддзі, або, інакш, скорасць хвалевага руху.

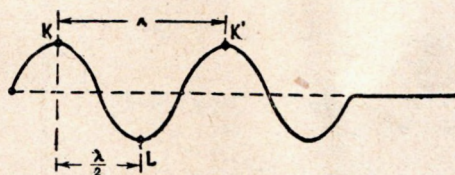
Скорасцю руху хвалі лічыцца скорасць перамяшчэння грэбня або ўпадзіны ў папярочнай хвалі, згущэння або разрэджання ў падоўжнай хвалі.

За час, роўны перыяду ваганняў T , згущэнне і разрэджанне або грэбень і ўпадзіна перамяшчаюцца на адлегласць λ , якая з'яўляецца даўжынёй хвалі. Значыць, скорасць руху v хвалі будзе вымярацца адноснай даўжынёй хвалі λ да перыяду ваганняў T , г. зн. $v = \frac{\lambda}{T}$.

Паколькі $\frac{1}{T} = f$, то можна напісаць, што

$$v = \lambda f,$$

г. зн. **вельчыня скорасці распаўсюджвання ваганняў у асяроддзі роўна здабытку даўжынёй хвалі на частату ваганняў.**



Рыс. 66а. Да паняцця даўжынёй хвалі.

Хваля пераносіць (перадае) энергію ад адной вагаючайся частачкі асяроддзя да другой. Энергія пачатковай частачкі, прыведзенай у ваганне (такую частачку называюць **вібратам**¹), бесперапынна будзе памяншацца, размяркоў-

ваючыся паміж частачкамі асяроддзя, і хвалевы працэс, затухаючы, урэшце спыніцца.

Для падтрымання бесперапыннага хвалевага працэсу неабходна бесперапынна папаўняць вібратар энергіяй.

Практыкаванне 11.

1. Складзі два гарманічныя вагальныя рухі аднолькавага перыяду і амплітуды, але адрозныя па фазе на 30° .

2. Начарніць графік вагальнага руху, які складаецца з двух гарманічных вагальных рухаў, перыяды якіх адносяцца паміж сабой, як 1:3. Амплітуды складаючых ваганняў узяць аднолькавымі.

¹ Вібратар — ад лац. вібрарэ — вагаць, гайдаць, дрыжаць.

РАЗДЕЛ III.

ГУК.

34. Паходжанне гуку. Сярод разнастайных вагальных і хвалевых рухаў, якія сустракаюцца ў прыродзе і тэхніцы, асабліва важнае значэнне ў жыцці чалавека маюць гукавыя ваганні і хвалі, або проста гукі. Дастаткова сказаць, што наша мова, якая дае нам магчымасць мець зносіны паміж сабой, складаецца з рада гукаў, якія ідуць адзін за другім. Мы лёгка адрозніваем голас аднаго чалавека ад голасу другога, адно слова ад другога слова.

Вуха, пры дапамозе якога мы ўспрымваем гук, улаўлівае нават найдрабнейшыя адценні чалавечага голасу: радасць, сум, гнеў і г. д.

Аддзел фізікі, у якім вывучаюцца гукавыя з'явы, называецца акустыкай¹.

Простыя назіранні паказваюць нам, што часткі гучальнага цела знаходзяцца ў вагальным руху.

Прыгледзімся ўважліва да гучальнай струны: яна стала ў сярэдзіне нібы таўсцейшай, а контуры яе зрабіліся менш яснымі. Выгляд струны змяніўся ад таго, што яна вагаецца паміж крайнімі становішчамі 1 і 2 (рыс. 67). Ваганні струны настолькі хуткія, што мы не можам сачыць за яе рухам. Калі да гучальнай струны наблізіць канец

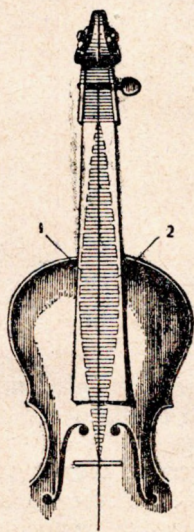


Рис. 67. Ваганне гучальнай струны.



Рис. 68. Вывучэнне ваганняў гучальнага камертона.

папяровай палоскі, то палоска будзе падскокваць ад штуршкоў струны. Пакуль струна вагаецца, мы чуем гук; спынім струну, і гук спыняецца.

Пры вывучэнні гукавых з'яў вельмі часта ў якасці крыніцы гуку карыстаюцца камертонам (рыс. 68). Калі па камертону ўдарыць мяккім малаточкам або правесці па ім смычком, то камертон загучыць.

¹ Ад грэч. слова акусцікас — слыхавы.

Паднясём да гучальнага камертона лёгкі шарык (шкляную пацерачку), падвешаны на нітцы, — шарык будзе адскокваць ад камертона.

Дрыжанне гучальнага камертона можна адчуць і непасрэдна, дакрануўшыся злёгка да яго ножак пальцам. Калі ж ножку камертона заціснуць, то ён не здолее больш вагацца, і гук спыніцца.

Крыніцамі гукаў асабліва лёгка робяцца целы, якія маюць вялікую пругкасць, напрыклад нацягнутая сталёная струна, камертон, заціснутая адным канцом у цісках сталёная пласцінка, званок, драўляная дошчачка і інш. Крыніцамі гукаў могуць быць не толькі цвёрдыя целы, але і вадкасці, а таксама газы. Так, напрыклад, нярэдка вада «спявае» ў водаправодных трубах або «гудзе» паветра ў дымаходзе; слуп паветра, які вагаецца, з'яўляецца крыніцай гуку ў арганіх трубах і ў розных іншых духавых інструментах.

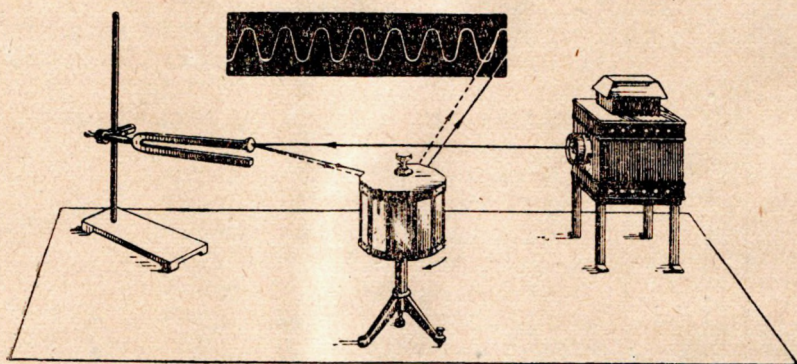


Рис. 69. Запіс ваганняў камертона.

35. Просты від гукавых ваганняў. Даследуем крыху падрабязней вагальны рух камертона. Для гэтага прымацуем да адной з ножаў камертона лёгкае люстэрка і пусцім на люстэрка тонкі пучок святла. Святло адбіваецца ад люстэрка, затым падае на другое шматграннае люстра, якое можа рухацца вакол вертыкальнай восі, адбіваецца ад яго і трапляе на экран (рыс. 69). На экране ўтвараецца невялікая светлая пляма. Калі цяпер прымусім гучаць камертон, злёгка ўдарыўшы яго гумавым малаточкам, то на экране замест светлай плямы ўтворацца вертыкальная рыска.

Спынім камертон і будзем хутка вярцець шматграннае люстра, на экране мы заўважым суцэльную гарызонтальную лінію. Калі цяпер зноў прымусім камертон гучаць, то на экране мы атрымаем сіноіду (рыс. 69). Значыць, *ваганні камертона з'яўляюцца сіноідальнымі, або гарманічнымі, ваганнямі*. Яны ўяўляюць сабой найбольш просты від гукавых ваганняў.

36. Класіфікацыя гукаў. Па форме і характару хвалі прынята адрозніваць тры віды гукаў: 1) гукавыя ўдары, 2) шумы і 3) музычныя гукі, або тоны.

Гукавыя ўдары ўзнікаюць пры выстрале, выбуху, электрычнай іскры, пры ўдары якіх-небудзь цяжкіх цел і г. д.

Ударная хваля, якая адпавядае гэтым гукам, уяўляе сабой адзінкавую хвалю.

Шумы ўяўляюць сабой паслядоўнасць перыядычных удараў. Такімі, напрыклад, з'яўляюцца шум ветру ў лісцях дрэў, трэск пры ламанні дрэва, ляск жалеза, скрып і г. д.

Музычныя гукі выклікаюцца перыядычнымі ваганнямі крыніц: яны складаюцца з рада аднолькавай даўжыні і формы хваль, якія бесперапынна ідуць адна за другой. Такімі, напрыклад, з'яўляюцца гукі камертона, музычных інструментаў, спевакоў і г. д.



Рис. 70. Ад гучальнага званочка ў паветры распаўсюджаюцца хвалі, якія даходзяць да вуха.

37. Распаўсюджванне гукаў. Мы ўспрымаем гук дзякуючы нашаму органу слыху — вуху. Вуха з'яўляецца для нас прыёмнікам гуку. Паміж вухам і гучальным (вагаючымся) целам — вібратам — знаходзіцца перадаючае асяроддзе; часцей за ўсё ім з'яўляецца паветра.

Калі якое-небудзь цела гучыць, яно вагаецца, яго ваганні перадаюцца прылягаючым частачкам паветра, якія таксама пачынаюць вагацца і перадаюць ваганні суседнім частачкам, а гэтыя ў сваю чаргу перадаюць ваганні далей і г. д. У выніку ў паветры ўзнікаюць і распаўсюджаюцца гукавыя хвалі (рис. 70). Гэтыя хвалі выклікаюцца вагальным рухам частачак асяроддзя (паветра), прычым ваганні частачак адбываюцца ў напрамку распаўсюджвання хвалі, г. зн. з'яўляюцца падоўжнымі ваганнямі.

Неабходнай умовай для перадачы гуку ад вібратора да прыёмніка (у прыватнасці, да нашага вуха) з'яўляецца існаванне пругкага асяроддзя паміж вібратам і прыёмнікам. Схематычна працэс распаўсюджвання гуку можна паказаць так:

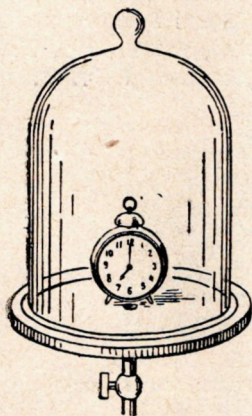
Вібратор → перадаючае асяроддзе → прыёмнік.

Калі паміж вібратам і прыёмнікам устараніць пругкае гукаперадаючае асяроддзе, то гукавыя хвалі не змогуць дасягнуць прыёмніка.

Змесцім пад каўпак паветранага насоса гадзіннік-будзільнік (рис. 71). Пакуль у каўпаку знаходзіцца паветра, гук звонка мы чуем выразна. Пры адкачванні паветра з-пад каўпака гук паступова слабее і, нарэшце, робіцца нячутным. Малатчак працягвае ўдараць

па талерцы званка; значыць, талерка вагаецца, але гэтыя ваганні далей ужо не могуць распаўсюджвацца (няма перадаючага асяроддзя) і не могуць дайсці да нашага вуха. Упусцім пад каўпак паветра і зноў пачуем звон.

Пакладзём на адзін канец доўгай дошкі кішэнны гадзіннік, а самі адыйдзем да другога канца. Прыкладшы вуха да дошкі, мы выразна пачуем ход гадзінніка.



Рыс. 71. Дослед, які даказвае, што беспаветраная прастора не перадае гукавых ваганняў.

Прывяжам да металічнай лыжкі вярочку. Канцы вярочкі прыкладзём да вушэй. Уда-раючы па лыжцы, пачуем моцны гук. Яшчэ больш моцны гук пачуем, калі вярочку за-менім дротам, але зусім не пачуем гуку, калі замест вярочкі возьмем гумавы шнур.

Здольнасць розных цел перадаваць гукавыя ваганні называецца гукапра-воднасцю.

Мяккія і порыстыя целы — дрэнныя правад-нікі гуку. Каб ахаваць якое-небудзь памяш-канне ад пранікнення пабочных гукаў, сцены, падлогу і столь пракладваюць праслойкамі з гукапаглынаючых матэрыялаў. Такімі матэ-рыяламі з'яўляюцца: лямец, дываны, прэсавы-ны корак, порыстыя каменні, свінец. Гукавыя хвалі ў такіх праслойках хутка затухаюць.

Вадкасці добра праводзяць гук. Рыба, на-прыклад, чуе крокі і галасы на беразе, гэта вядома спрактыкаваным рыбалавам.

Такім чынам, **гукавыя хвалі распаў-сюджваюцца ў цвёрдых, вадкіх і газападобных целах, але не могуць распаўсюджвацца ў беспаветранай прасторы.**

38. Скорасць распаўсюджвання гуку. Простыя назіранні паказваюць, што гук распаўсюджваецца ў кожным асяроддзі з пэўнай скорасцю.

Калі мы глядзім здалёку на страляніну з ружжа, то спачатку бачым агонь і дым, а потым праз некаторы час чуем гук выстралу. Дым паяўляецца ў той жа час, калі адбываецца першае гукавое ваганне. Вымераўшы прамежак часу (t сек) паміж момантам узнікнення гуку (момант паяўлення дыму) і момантам, калі ён даходзіць да вуха, і ведаючы адлегласць (s м) ад нас да крыніцы гуку, можна вызна-чыць скорасць распаўсюджвання гукавых хваль, або скорасць гуку:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Вымярэнні паказваюць, што скорасць гуку ў паветры пры 0°C і нармальным атмасферным ціску роўна $332 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

Пры павышэнні тэмпературы паветра скорасць гуку ўзрастае, па-колькі пры гэтым узрастае пругкасць паветра. Напрыклад, пры 15°C

скорасць гуку ў паветры роўна $342 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, пры 30°С — $349 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, пры 100°С — $386 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

У іншых газах скорасць гуку не такая, чым у паветры. Чым лягчэйшы газ, тым больш рухомыя малекулы яго і тым скорасць гуку ў ім большая. У вадародзе яна роўна $1280 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ пры 0°С . У вуглякіслым газе скорасць гуку меншая: пры 0°С яна роўна $260 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. Скорасць гуку ў вадзе ў $4 \frac{1}{2}$ раза большая, чым у паветры. У металах скорасць гуку яшчэ большая.

Скорасць гуку ў розных асяроддзях (пры 0°С) $\left(\text{у } \frac{\text{м}}{\text{сек}} \right)$

Паветра	332
Вада	1450
Медзь	3800
Жалеза	4900
Шкло	5600
Яловае дрэва	4800
Корак	430—530
Каўчук	50

39. Музычныя гукі. Вышыня тону. Музычныя гукі або, як прынята гаварыць, музычныя тоны, характарызуюцца вышынёй, гучнасцю і тэмбрам.

Возьмем два камертоны, якія даюць гукі рознай вышыні, і запішам графікі іх ваганняў на закопчанай пласцінцы. Мы атрымаем крывыя, паказаныя на рыс. 72. Верхняя крывая атрымана ад камертона, які дае нізкі тон, ніжняя — ад камертона з высокім тонам. У першым выпадку атрымалася крывая з больш доўгай хваляй, у другім — з хваляй меншай даўжыні. Адсюль відаць, што ў першага камертона (з нізкім тонам) большы перыяд ваганняў і меншая частата, чым у другога.

У выпадку гарманічных гукавых ваганняў, якімі, напрыклад, з'яўляюцца ваганні камертона, наша адчуванне вышыні тону аб'ектыўна адпавядае частаце ваганняў. Чым меншы перыяд і адпаведна большая частата ваганняў, тым тон вышэйшы, і наадварот: чым меншая частата ваганняў, тым тон ніжэйшы.

Такім чынам, **фізічным з'явам — ваганням рознай частаты — адпавядаюць адчуванні рознай вышыні тонаў.**

Наша вуха здольна ўспрымаць як гук ваганні ў межах ад 20 да 20 000 гц.

Межы для гукаў чалавечага голасу знаходзяцца паміж 64 гц (нізкая басовая нота) і 1300 гц (верхняя сапранавая нота). Ніжняя нота «ля» раяля мае 27,5 гц, а яго верхняя «до» — 4096 гц.

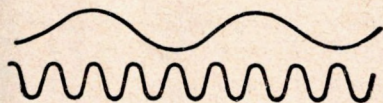
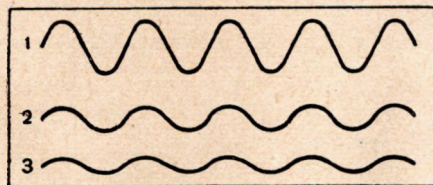


Рис. 72. Верхняя крывая адпавядае нізкаму тону, ніжняя — высокаму тону.

У прыродзе сустракаюцца ваганні, якія маюць частату, не ўспрыймаемую нашым вухам. Ад крыніцы нячутнага гуку хвалі, вядома, усё ж даходзяць да нашага вуха і ўздзейнічаюць на барабанную перапонку, але наш слыхавы апарат не адклікаецца на гэтыя ўздзеянні. Гукавыя ваганні, частоты якіх ляжаць за межамі чутных, г. зн. вышэй 20 кгц, называюцца ультрагукамі.

Сучасная тэхніка валодае сродкамі атрымання ультрагукаў у шырокім дыяпазоне частот ад 20 кгц да 500 мкгц.



Рыс. 73. Графік трох тонаў аднолькавай частаты, але рознай гучнасці; крывой з большай амплітудай вагання адпавядае больш гучны тон.

Ультрагукі ў цяперашні час знайшлі досыць шырокае прымяненне ў тэхніцы. Імі карыстаюцца, напрыклад, для вымярэння марскіх глыбін (эхалоты). Ультрагукі прымяняюцца для выяўлення розных дэфектаў у металічных вырабах і адліўках (ультрагукавая дэфектаскапія). Пры дапамозе ультрагукавых ваганняў атрымліваюць розныя эмульсіі.

Ультрагукі могуць утвараць біялагічныя і фізіялагічныя дзеянні. Так, напрыклад, абпраменьванне ультрагукамі насення павышае яго ўсходжасць, абпраменьванне ультрагукамі малака захоўвае яго на доўгі час ад скісання. Чырвоныя крывяныя шарыкі пад дзеяннем ультрагукаў разбураюцца, і з прычыны гэтага жывёлы гінуць. Дробныя рыбкі і жабы забіваюцца ультрагукамі праз 1—2 мінуты.

40. Сіла і гучнасць гуку. Сілаю гуку¹ называецца велічыня, вымяраемая колькасцю энергіі, якая штосекундна працякае праз пляцоўку ў 1 см^2 , перпендыкулярную к напрамку гукавой хвалі.

Сілу гуку вымяраюць у $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$.

Сіле гуку адпавядае адчуванне гучнасці, падобна да таго, як частаце ваганняў — вышыня тону.

Сіла гуку і гучнасць — паняцці нераўназначныя. Сіла гуку характарызуе фізічны працэс незалежна ад таго, успрымаецца ён слухачом або не; гучнасць жа з'яўляецца суб'ектыўнай якасцю гуку.

Разгледзім цяпер, ад чаго залежыць сіла гуку, а значыць, і яго гучнасць. Запішам для гэтага ваганні камертона паслядоўна некалькі разоў з некаторымі прамежкамі ў часе (рыс. 73). Гук камертона па-ступова заціхае, і гэта зараз жа адбываецца на графіку яго ваганняў.

Як відаць з графікаў 1, 2, 3, перыяд ваганняў камертона не мяняўся: грэбені і ўпадзіны на ўсіх трох графіках аднолькава частыя. Але па меры аслаблення гуку памяншалася амплітуда ваганняў.

¹ Слова сіла ў выразе сіла гуку не адпавядае зместу гэтага паняцця, паколькі мы маем тут справу не з сілай, а з энергіяй.

У самага моцнага гуку амплітуда была найбольшай (графік 1); калі гук стаў амаль нячутным, амплітуда ваганняў аказалася маленькай (графік 3). Калі камертон перастане вагацца, графік ператворыцца ў прамую лінію.

Такім чынам, мы бачым, што сіла гуку звязана з амплітудай ваганняў. *Чым большая амплітуда ваганняў, тым мацнейшы гук; чым меншая амплітуда, тым гук слабейшы.*

Калі якое-небудзь цела гучыць, то яно прыводзіць у ваганне навакольных частачкі асяроддзя (напрыклад, частачкі паветра) і аддае ім пры гэтым частку сваёй энергіі. Запас энергіі ў гучальным цэле памяншаецца, памяншаецца амплітуда яго ваганняў, слабее гук.

Пры распаўсюджванні ў асяроддзі гук слабее па меры аддалення ад крыніцы. Уся энергія, якая спачатку была сканцэнтравана каля аднаго цэнтра — крыніцы гуку, па меры аддалення ад яго будзе размяркоўвацца на ўсё большы і большы лік частачак асяроддзя; на долю кожнай частачкі будзе прыпадаць усё менш і менш энергіі. Пры распаўсюджванні гукавых хваль у ізаатропным¹ асяроддзі паверхня распаўсюджаючайся хвалі будзе сферай з цэнтрам *O*, практычна супадаючым з крыніцай гуку. Паверхня сферы будзе ўзрастаць прапарцыянальна квадрату адлегласці ад крыніцы; рыс. 74 тлумачыць гэта. Энергія, якая прыпадае на кожную адзінку плошчы сферы, будзе змяняцца адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці ад крыніцы гуку. Адсюль: ***сіла гуку змяняецца адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці ад назіральніка да крыніцы гуку.*** Змяняецца пры гэтым і звязанае з гэтай велічынёй адчуванне гучнасці, што кожнаму вядома з практыкі.

Калі накіраваць гук уздоўж трубы з адным і тым жа папярочным сячэннем, то ў гэтым выпадку гук удалечыні амаль не траціць сваёй сілы. Малое аслабленне гуку з адлегласцю можна назіраць і ў доўгіх вузкіх калідорах.

Часта для перагавораў на адлегласці прымяняюцца конусападобныя трубы-рупары. Рупар не дае гукавым хвалям расейвацца ва ўсе бакі і прымушае іх ісці ў адным напрамку. Рупарам можна карыстацца таксама для таго, каб сабраць рассяяныя гукавыя хвалі. Прыкладзём рупар да вуха яго вузкім бокам, і гукі ўзмоцняцца. На вуха дзейнічае ўся энергія, прыйшоўшая да знадворнага, шырокага боку

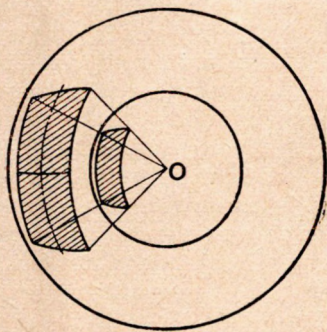


Рис. 74. Энергія ў гукавой хвалі, якая прыпадае на кожную адзінку паверхні, змяняецца адваротна прапарцыянальна квадрату адлегласці ад пунктавай крыніцы гуку.

¹ Ізаатрапія (ад грэчаскіх слоў: іза — аднолькавы, тропас — характар) — фізічная асаблівасць рада цел, якая заключаецца ў тым, што фізічныя ўласцівасці іх (цеплаправоднасць, пругкасць, электраправоднасць і інш.) аднолькавыя па ўсіх напрамках.

рупара. У колькі разоў знадворная адтуліна рупара па плошчы большая за адтуліну вуха, у столькі разоў будзе ўзмацняцца і гук.

Наша вуха забяспечана ўласным рупарам — вушной ракавінай. Часам, каб улаўліваць слабыя гукі, мы павялічваем гэты рупар, прыкладваючы руку да вушной ракавіны.

Чалавечая вуха з'яўляецца выключна адчувальным: яно ўлаўлівае гукі, якія ў мільён разоў слабейшыя за чалавечы голас звычайнай гучнасці. З другога боку, чалавек прывыкае пераносіць і такія моцныя гукі, як артылерыйская кананада.

Аднак наша вуха аказваецца не аднолькава адчувальным да гукаў рознай частаты; найбольш адчувальна яно да тонаў, якія знаходзяцца ў межах 1000 — 3000 *гц*. Каб гук быў пачут ва ўмовах найбольшай адчувальнасці (каля 2000 *гц*), гукавыя хвалі, як паказваюць сучасныя вымярэнні, павінны прыносіць да вуха за кожную секунду энергію не менш 5 трылённых доляў эрга. Амплітуда ваганняў частачак паветра пры гэтым аказваецца менш адной дзесяцімільярднай міліметра. Цікава, што адчувальнасць вока да энергіі святла такога ж парадку, як і адчувальнасць вуха да энергіі гуку.

41. Тэмбр гуку. Усім добра вядома, што гукі адной і той жа вышыні, узноўленыя на скрыпцы, кларнеце, раялі, спеваком або спявачкай, адрозніваюцца адзін ад другога асаблівай якасцю — мяккасцю або рэзкасцю, меншай або большай выразнасцю. Мы па голасу пазнаём знаёмых нам людзей. Нават у аднаго і таго ж чалавека розныя галасныя адрозніваюцца адзін ад другога.

Тэмбрам гуку называецца асобая якасць гуку, яго своеасаблівая „афарбоўка“.

Тэмбр тону дадзенай вышыні вызначаецца формай той перыядычнай крывой лініі, якая паказвае ваганні, утвараемыя крыніцай.

Гарманічныя ваганні цэл утвараюць хвалю, якая мае форму, паказаную на *рис. 75а* і называемую сінусаідальнай хваляй. Такая хваля дае адчуванне простага, або чыстага, тону.

У скрыпцы ж, дзе ваганні струн узбуджаюцца смычком, або, напрыклад, у языковай трубе атрымліваюцца хвалі больш складанай формы (*рис. 75б*), якім адпавядаюць і больш складаныя гукі.

Пры дапамозе спецыяльных аналізатараў гуку можна ўстанавіць, што ўсякі складаны музычны гук складаецца з рада простых тонаў, частоты ваганняў якіх адносяцца, як 1:2:3:4... Найбольш нізкі тон у складаным музычным гуку называецца асноўным. Ён мае такія ж перыяд, як і складаны гук. Астатнія простыя тоны, якія маюць у два, тры, чатыры і г. д. разоў большыя частоты, называюцца вышэйшымі гарманічнымі тонамі, або абертонамі. У § 27 было ўстаноўлена, што складанне гарманічных ваганняў розных частот дае рэзультуючае ваганне, якое абазначаецца складанай перыядычнай крывой (гл. *рис. 59г*). Аналізатар жа дазваляе вылучыць тыя простыя ваганні, якія ўтвараюць складаны гук.

На *рис. 76* зверху паказан графік гукавой хвалі, якая ўзбуджаецца скрыпкай, а ўнізе тры сінусаідальныя хвалі, адна з якіх адпавядае

асноўнаму тону, а іншыя дзве — двум найбольш інтэнсіўным абертанам гуку скрыпкі.

Падабраўшы адпаведнае спалучэнне чыстых тонаў пры дапамсзе камертонаў, можна ўзнавіць складаны гук, падобны па тэмбру да гукаў скрыпкі, языковай трубы або іншых якіх-небудзь музычных інструментаў.

У музыцы ўжываюцца складаныя гукі, багатыя абертанамі. Чым больш да асноўнага тону прымешана абертанаў, тым, у залежнасці ад сілы кожнага з гэтых абертанаў, тэмбр гучу будзе больш поўным і разнастайным, г. зн. больш прыемным для слыху. Асабліва багатыя абертанамі гукі скрыпкі і галасы спевакоў.

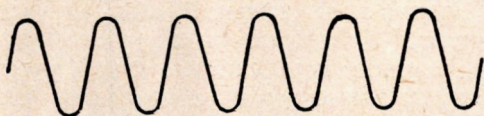


Рис. 75а. Графік простага, або чыстага, тону.



Рис. 75б. Графік гучу, атрыманага ў языковай трубе.

«Простыя тоны, якія мы маем ад нашых камертонаў, — пісаў А. Г. Сталетаў, — не ўжываюцца ў музыцы: яны гэтак жа прэсныя і нясмачныя, як хімічна чыстая вада, — яны бесхарактарныя».

42. Адбіццё гукавых хваль. Калі гучавыя хвалі на сваім шляху сустракаюць якую-небудзь перашкоду (горы, лес, сцяну і да т. п.), яны

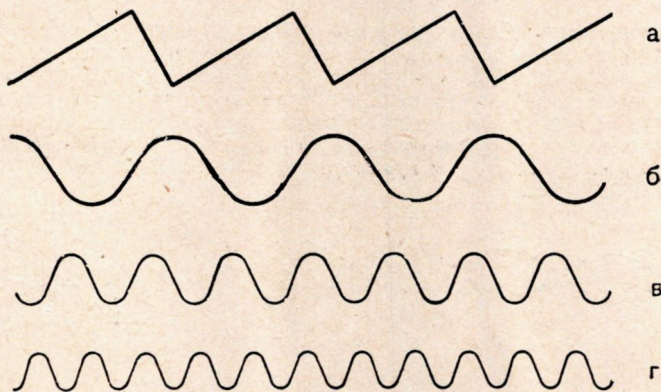


Рис. 76. а — графік складанага гучу скрыпкі; б — графік асноўнага тону гучу скрыпкі; в, г — графікі двух найбольш інтэнсіўных абертанаў гучу скрыпкі.

адбіваюцца. Калі адбітая гучавая хваля даходзіць да нашага вуха, мы чуем гук, які называецца рэхам, або водгуллем.

Адбіты гук мы пачуем праз прамежак часу, на працягу якога гучавая хваля праходзіць двойную адлегласць паміж крыніцай гучу і перашкодай.

Гул грому тлумачыцца шматразовымі адбіццямі яго ад воблакаў і зямлі. Калі гук адбіваецца ад блізкіх перашкод, рэха зліваецца з першапачатковым гукам і ўзмацняе яго. Таму гукі ў зачыненых памяшканнях нам здаюцца больш гучнымі, чым на адкрытым паветры.

Памяшканні з гладкімі сценамі, падлогай і столлю маюць уласцівасць вельмі добра адбіваць гукавыя хвалі. З прычыны гэтага ў такім памяшканні атрымліваецца адчуванне вялікай гучнасці гуку; дзякуючы набяганню папярэдніх гукавых хваль на наступныя атрымліваецца перамешванне гукаў, утвараецца гул: гук у памяшканні не адразу знікае разам са спыненнем дзеяння яго крыніцы.

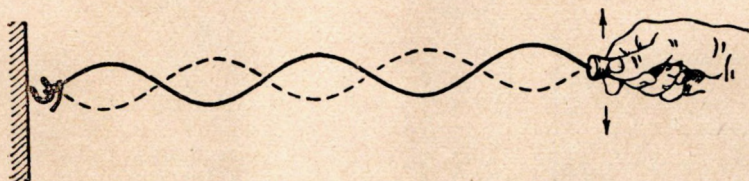
Акустыка памяшкання характарызуецца так званым часам рэверберацыі — часам згасання гуку да мяжы нячутнасці. Рэверберацыя залежыць, з аднаго боку, ад аб'ёму памяшкання, а з другога — ад яго формы і ад матэрыялу сцен, столі і падлогі.

Памяшканні з мяккай абіўкай сцен, драпіроўкамі, мяккай мэбляй, а таксама напоўненыя публікай, слабей адбіваюць гукавыя хвалі; у значнай ступені яны паглынаюцца мяккім асяроддзем, а таму і рэверберацыя іх значна меншая.

Але вельмі памяншаць рэверберацыю таксама не трэба, паколькі гукі тады надзвычай хутка гаснуць і не маюць дастатковай гучнасці і яркасці. Спевакі і музыканты ведаюць, як цяжка спяваць і іграць у невялікіх пакоях, перапоўненых мяккай мэбляй, драпіроўкай, дыванамі.

У адной з лепшых у акустычных адносінах залаў — у Калоннай зале Дома Саюзаў у Маскве, час рэверберацыі каля 1,75 сек, калі яна запоўнена публікай, і каля 4 сек — у пустой.

43. Стаячыя хвалі. Страсянём рукой свабодны канец вісячай вяроўкі. Па вяроўцы габяжыць хваля. Хваля дойдзе да замацаванага канца, адабецца тут і пойдзе назад (рыс. 77). Калі мы будзем бесперапынна вагаць рукою канец вяроўкі, то атрымаецца рад бесперапынных бягучых хваль, якія ідуць адна за другой, а насустрач ім ад замацаванага канца пабяжыць такі ж рад адбітых хваль. Абе-дзве сістэмы хваль будуць накладвацца адна на другую, утвараючы так званую стаячую хвалю. Разгледзім працэс утварэння стаячай хвалі.



Рыс. 77. Атрыманне стаячых хваль на вяроўцы.

Няхай перыяды і амплітуды бягучых і адбітых хваль аднолькавыя. У некаторы момант часу абедзве хвалі будуць накладвацца адна на другую так, як паказана на рыс. 78, а. Затым гэтыя хвалі разыйдуцца: адна перамесціцца на экватарыю адлегласць управа, другая — на такую ж адлегласць улева (рыс. 78, б).

Пры супадзенні хваль пункты a_1 , a_2 , a_3 і г. д. знаходзяцца ў становішчы раўнавагі. Яна захоўваецца і ў выпадку разыходжання хваль. Сапраўды, пры разыходжанні хваль адна хваля будзе зрушваць пункты ўверх, другая — на-столькі ж уніз. Такія нерухомыя пункты называюцца вузламі.

Уся вяроўка (рис. 77) разбіваецца вузламі на некалькі аднолькавых вагаючыхся ўчасткаў. У той час як адзін з гэтых участкаў ідзе ўверх (грэбень), суседні ўчастак адхіляецца ўніз (упадзіна).

Пункты b_1, b_2, b_3 і г. д. пры супадзенні хвалі (рис. 78, а) маюць найбольшы зрушэнні, роўныя падвоенай амплітудзе (рис. 78, в). Пры разыходжанні хвалі зрушэнні гэтых пунктаў будуць спадаць да нуля (рис. 78, г, д), а затым змяняць свае напрамкі (рис. 78 е, ж), дасягнуць найбольшай велічыні (рис. 78, з) і зноў будуць спадаць да нуля і г. д. Тое ж будзе адбывацца і з пунктамі c_1, c_2, c_3 і г. д. Чым бліжэй такі пункт размешчан да b_1, b_2 або да b_3 і г. д., тым з большай амплітудай ён будзе вагацца.

Пункты b_1, b_2, b_3 , якія маюць найбольшыя амплітуды вагання, утвараюць пучнасці стаячай хвалі

Адлегласць паміж двума суседнімі пучнасямі, або паміж двума суседнімі вузламі, роўна палавіне даўжыні хвалі, а адлегласць паміж вузлом і бліжэйшай пучнасяю роўна чвэрці даўжыні хвалі.

З рис. 78 відаць, што ўсе пункты, размешчаныя паміж двума суседнімі вузламі, г. зн. пункты, якія належаць адной і той жа паўхвалі, маюць аднолькавы напрамак руху (напрыклад, усе рухаюцца ўверх або, наадварот, уніз) і вагаюцца з аднолькавымі фазаі. Пункты ж двух суседніх паўхвалі рухаюцца ў працілеглыя бакі (адны ўверх, другія ўніз); фазы іх ваганняў працілеглыя, г. зн. адрозніваюцца на π або на 180° .

Энергія ў стаячай хвалі размеркавана так, што ў вобласцях, блізкіх да вузлоў хвалі, канцэнтруецца галоўным чынам энергія патэнцыяльная, а ў вобласцях, блізкіх да пучнасцей хвалі, канцэнтруецца энергія кінетычная. У той момант часу калі кінетычная энергія хвалі дасягае максімуму, патэнцыяльная энергія робіцца мінімальнай. Праз чвэрць перыяду максімуму дасягае энергія патэнцыяльная, а энергія кінетычная спадае да нуля.

Такім чынам, **у стаячай хвалі адбываецца бесперапыннае ператварэнне і пераарызкаванне энергіі, але пераносу энергіі няма.** Адсюль і тэрмін «стаячая хваля»

44. Назіранне гукавых стаячых хвалі. Падоўжныя стаячыя хвалі можна выявіць у паветры на наступным доследзе.

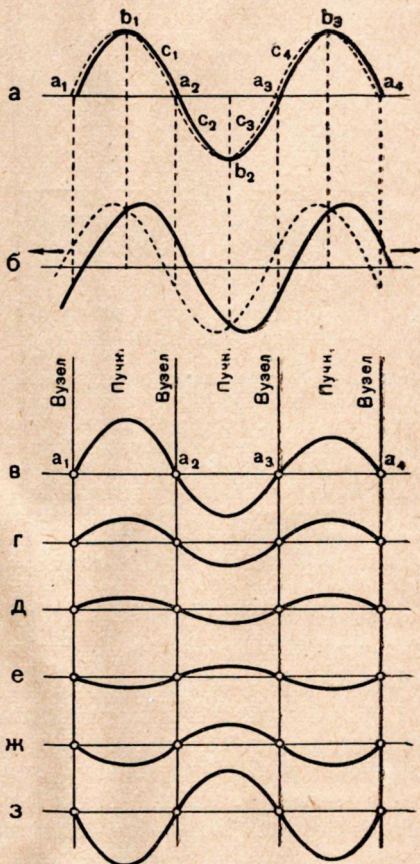


Рис. 78. Да тлумачэння механізма ўтварэння стаячых хвалі.

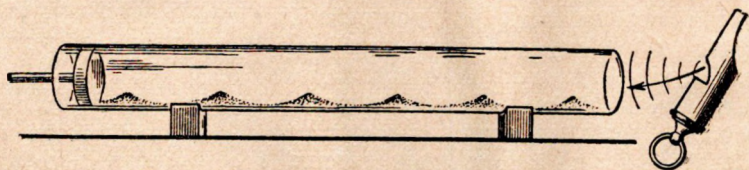


Рис. 79. Дзеянне стаячых хвалі на парашок у трубе.

Возьмем шкляную трубку, закрытую з аднаго канца (рыс. 79), насыплем у яе невялікі слой дробных сухіх коркавых апілак. Узбудзім цяпер перад адкрытым канцом трубки моцны гук. Ад гэтага канца трубки ў паветры будзе распаўсюджвацца падоўжная хваля, якая,

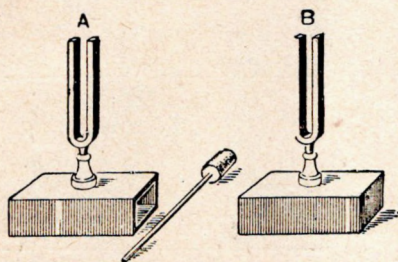


Рис. 80. Камертоны на скрынках для назірання гукавога рэзанансу.

дайшоўшы да канца трубки, адаб'ецца ад яго. У выніку ўзаемнага накладання бягучых і адбітых хваль у трубцы ўтвараюцца стаячыя хвалі. Парашок у пучкасах устрэсваецца, у вузлах жа застаецца ў спакоі. Размяшчэнне парашку ўтварае «пыльныя фігуры» паводле якіх можна меркаваць аб даўжыні стаячых хваль. Напаўняючы трубку якімі-небудзь іншымі газамі (напрыклад, вуглякістым газам, свяцільным газам), мы заўважым, што даўжыня хваль, утвораных ад адной і той жа крыніцы ваганняў, у розных газах розная.

У вуглякістым газе даўжыня хвалі меншая, у свяцільным газе, наадварот, большая ў параўнанні з даўжынёй хвалі ў паветры. Паколькі перыяд ваганняў у нашым доследзе — велічыня пастаянная, то з формулы $\lambda = vT$ вынікае, што скорасць распаўсюджвання хваль у вуглякістым газе і ў свяцільным газе павінна быць іншай, чым у паветры. У свяцільным газе хвалі распаўсюджваюцца хутчэй, а ў вуглякістым газе больш павольна, чым у паветры.

Даўжыні гукавых хваль у паветры, успрымаемыя нашым вухам, знаходзяцца ў межах ад 20 м (для самых нізкіх гукаў) да 1 см (для самых высокіх).

Гукавыя хвалі адной і той жа частаты ў вадзе

ў 4 $\frac{1}{2}$ раза, а ў жалезе ў 10 $\frac{1}{2}$ раза даўжэйшыя, чым у паветры.

45. Гукавы рэзананс і рэзанатары. З'яву рэзанансу можна назіраць на механічных ваганнях любой частаты, у прыватнасці і на гукавых ваганнях. Праробім наступны дослед. Паставім побач два аднолькавыя камертоны А і В, павярнуўшы адтуліны скрынак, на якіх яны ўмацаваны, насустрач адна другой (рыс. 80). Удараючы гумавым малатком па камертону А, прывядзём яго ў ваганне, а затым прыглушым пальцамі. Мы пачуем гук ад другога камертона В, які адклікаецца на ваганні камертона А падобна таму, як у доследах з маятнікамі (рыс. 62) маятнік С адклікаўся на ваганні маятніка А.

Зменім перыяд вагання камертона В, надзеўшы на ножку яго невялікую муфтаху. Паўтарыўшы дослед, мы выявім, што цяпер камертон В ужо не адклікаецца на ваганні камертона А.

Гукавыя хвалі, утвораныя камертонам А, дайшоўшы да камертона В, узбуджаюць вымушаныя ваганні яго з частатой, роўнай частаце ваганняў камертона А. Калі частата ваганняў камертона В

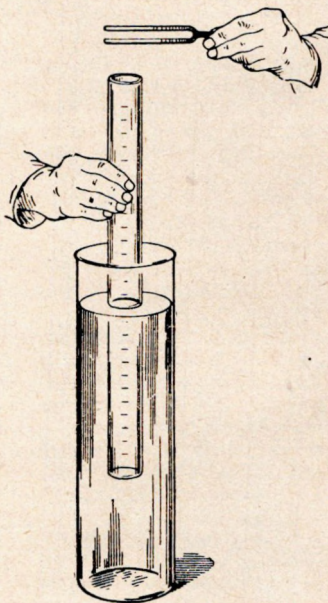


Рис. 81. Рэзананс паветранага слупа ў трубцы.

такая ж, як і камертона *A*, то мае месца рэзананс: камертон *B* моцна разгойдваецца. Калі ж частата камертона *B* іншая, то вымушаныя ваганні яго будуць настолькі слабымі, што гуку мы не пачуем.

Усе гэтыя з'явы мы і назіралі на нашых доследах.

Разгледзім цяпер, якую ролю адыгрываюць скрынкі, на якіх устанаўліваюцца камертоны. Праробім яшчэ адзін дослед. Апусцім у пасудзіну з вадой шырокую шкляную трубку (рыс. 81) і прымусім гучаць над яе адтулінай камертон. Вымаючы трубку з вады, мы будзем павялічваць слуп паветра ў ёй. Пры пэўнай даўжыні слупа

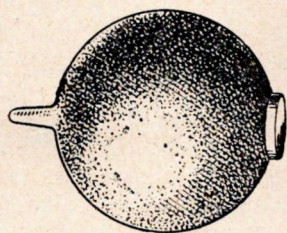


Рис. 82. Рэзанатар Гельмгольца.

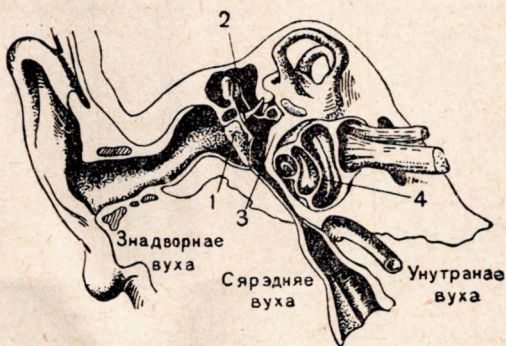


Рис. 83. Будова вуха чалавека.

паветра ў трубы мы пачуем досыць моцны гук. Калі далей вымаць пакрыху трубку з вады, гук будзе слабей і, нарэшце, зробіцца нячутным.

Вымярэнні паказваюць, што найменшая даўжыня рэзаніруючага слупа паветра заўсёды роўна $\frac{1}{4}$ даўжыні хвалі дадзенага гуку. Таму камертон устанаўліваецца на рэзанансавую скрынку, якая пабудавана так, што даўжыня яе роўна $\frac{1}{4}$ даўжыні гукавой хвалі, узбуджаемай дадзеным камертонам. Пры гэтых умовах слуп паветра ў скрынцы вагаецца ў рэзананс з ваганнямі камертона, што і стварае больш моцную гукавую хвалю ў акружаючым паветры, чым вагаючыся ножкі аднаго толькі камертона.

Рэзананс шырока выкарыстоўваецца ў музычных інструментах для ўзмацнення іх гукі.

Нямецкі вучоны Гельмгольц (1821—1894) пабудаваў асобныя рэзанатары, кожны з якіх адклікаецца толькі на які-небудзь адзін тон (рыс. 82). Вузкай адтулінай рэзанатар прыкладваецца да вуха. Праз шырокую адтуліну паступаюць у рэзанатар гукавыя хвалі. Унутры рэзанатар пусты. Уласны тон рэзанатара лёгка пачуць, прадзімаючы струмень паветра каля шырокай яго адтуліны. У складаным гучы такі рэзанатар адклікаецца толькі на тон, які супадае

з яго ўласным тонам. Маючы калекцыю такіх рэзанатараў, можна прааналізаваць розныя складаныя гукі, утвараемыя рознымі інструментамі: струннымі, духавымі, ударнымі, голасам і г. д. Удаецца такім спосабам вылучаць асобныя тоны з розных шумаў.

Рэзанатары ёсць і ў нашым галасавым апарате. Крыніцамі гуку ў галасавым апарате з'яўляюцца галасавыя звязкі. Яны прыходзяць у ваганне дзякуючы прадзіманню паветра з лёгкіх і ўзбуджаюць гук, асноўны тон якога залежыць ад іх нацяжэння. Гэты гук багаты абертанамі. Гартань узмацняе тыя з абертонаў, частата ваганняў якіх блізкая да яе ўласнай частаты. Далей гукавыя хвалі пападаюць у поласць рота. Для кожнай галоснай ёсць сваё асобае становішча рота і ў выніку гэтага пэўная форма рэзанатарнай поласці ў роне.

46. Фізіка вуха. Вуха ўяўляе сабой складаны гукапрыёмны апарат, які працуе ў надзвычай шырокім дыяпазоне частот і амплітуд.



Рыс. 84. Слухаючы двума вушамі, мы заўсёды можам павярнуць галаву так, што будзем глядзець па напрамку крыніцы гукі.

Гукавыя хвалі спачатку дасягаюць нашага знадворнага вуха — яго вушной ракавіны, якая ўяўляе сабой рупар, што збірае гукавыя хвалі. Па знадворнаму слыхавому праходу гукавыя хвалі даходзяць да барабаннай перапонкі 1 (рыс. 83), якая аддзяляе знадворнае вуха ад сярэдняга. Пад уплывам прыходзячых хваль гэтая

перапонка вагаецца, утвараючы вымушаныя ваганні з частатой ўспрымаемага гукі. Ваганні барабаннай перапонкі пры дапамозе дзеючай як рычаг сістэмы сучлененых костачак 2: малаточка, кавадла і стрэмецка — перадаюцца так званаму авальнаму акну 3, якое закрывае ўнутраную поласць вушнага лабірынта. Вушны лабірынт у той яго частцы, дзе ляжаць адчувальныя да механічнага раздражнення канцы слыхавога нерва, запоўнен вадкасцю — эндалімфай.

Унутры знаходзіцца так званая асноўная мембрана 4, якая складаецца з некалькіх тысяч (каля 4500) валокнаў рознай даўжыні, настроеных кожнае на некаторы пэўны тон.

Прышоўшыя ва ўнутранае вуха гукавыя хвалі абумоўліваюць ваганні тых валокнаў асноўнай мембраны, якія настроены на частоты, што змяшчаюцца ў гэтых хвалях.

З прыведзенага вышэй апісання слыхавога ўспрымання робіцца зразумелым, чаму наша вуха здольна адрозніваць асобныя тоны ў складаным гукі, напрыклад у музычным акордзе.

Вялікае значэнне мае тое, што ў нас не адно вуха, а два аднолькавыя. Аказваецца, з дапамогай двух вушэй мы можам вызначыць напрамак, па якому да нас даходзіць гук. Калі ж адно з нашых вушэй закладзена ватай, мы не можам дакладна вызначыць, адкуль да нас нясуцца гукі. Слухаючы двума вушамі, мы заўсёды можам павярнуць галаву так, што будзем глядзець па напрамку крыніцы гукі (рыс. 84).

47. Запіс і ўзнаўленне гуку. Магчымасць запісваць гукі і затым узнаўляць іх была адкрыта яшчэ ў 1877 г. амерыканскім вынаходцам Эдысонам. Гуказапіс хутка ўвайшоў у наша жыццё. Мала цяпер знойдзецца людзей, якія не ведалі б гукаўзнаўляльных апаратаў — грамафонаў¹ або іх партатыўных узораў — патэфонаў. Дзякуючы магчымасці запісваць і ўзнаўляць гукі, паявілася гукавое кіно.

Запіс музычных твораў, дакладаў, апавяданняў і нават цэлых п'ес на патэфонныя пласцінкі стаў масавай формай гуказапісу, разлічанага на самае шырокае кола спажывцоў.

Існуе некалькі сістэм гуказапісу. З іх механічная сістэма, прынцып якой быў адкрыт Эдысонам, з'яўляецца да гэтага часу адной з асноўных. Гэтая сістэма прайшла вялікі шлях развіцця, дасягнуўшы ў нашы дні высокай дасканаласці.

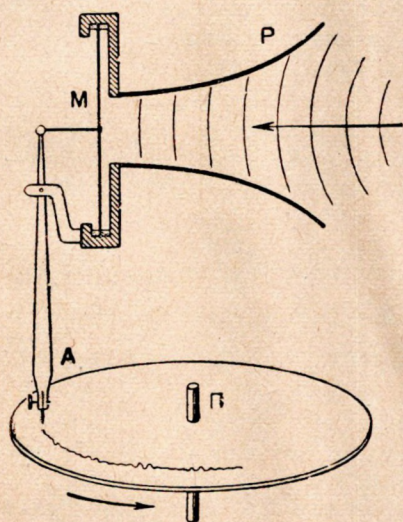


Рис. 85. Схема механічнага запісу гуку.

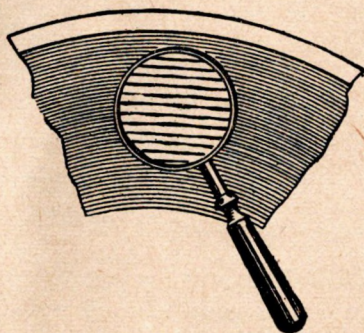


Рис. 86. Выгляд гукавых барэзэнак на пласцінцы (праз лупу барэзэнка бачны зусім выразна).

На рис. 85 дадзена спрошчаная схема механічнага гуказапісваючага прыстасавання.

Гукавыя хвалі ад крыніцы (спевака, аркестра і г. д.) трапляюць у рупар *Р*, у якім замацавана тонкая пругкая пласцінка *М*, называемая мембранай. Пад дзеяннем гэтых хваль мембрана вагаецца. Ваганні мембраны перадаюцца звязанаму з ёю разцу *А*, вастрыё якога чэрціць пры гэтым на верцячымся дыску *П* гукавую барэзэнку. Гукавая барэзэнка закручваецца па спіралі ад краю дыска да яго цэнтру.

На рис. 86 паказан выгляд гукавых барэзэнак на пласцінцы (праз лупу барэзэнка бачны зусім выразна).

Дыск, на якім робіцца гуказапіс, вырабляецца са спецыяльнага мякакага матэрыялу; звычайна гэта восковы сплаў, які складаецца

¹ Грамафон — ад грэч. слоў: грама — запіс, фоне — гук.

з рада мінеральных, раслінных і жывёльных воскаў, а таксама іншых арганічных рэчываў. З гэтага васковага дыска здымаюць гальвана-пластычным спосабам медную копію (клішэ), якой затым робяць адбіткі на дысках, вырабленых са спецыяльных матэрыялаў. Так атрымліваюцца грамафонныя пласцінкі.

Пры ўзнаўленні гуку ставяць грамафонную пласцінку пад іголку, звязаную з мембранай грамафона, і прыводзяць пласцінку ў вярчэнне.

Рухаючыся па хвалістай баразенцы пласцінкі, канец іголки вагаецца; разам з ім вагаецца і мембрана, прычым гэтыя ваганні досыць дакладна ўзнаўляюць запісаны гук.

У наш час шырокае распаўсюджванне атрымаў магнітны гуказапіс¹ з дапамогай спецыяльных апаратаў (напрыклад, магнітафонаў). Магнітны гуказапіс настолькі павысіў якасць ўзнаўлення гуку, што ён стаў пераўзыходзіць усе іншыя віды гуказапісу.

Практыкаванне 12.

1. Назіральнік, стоячы на адлегласці 200 м ад вертыкальнай скалы, адрывіста выгукнуў. Праз колькі часу ён пачуе рэха? Скорасць распаўсюджвання гуку прыняць роўнай $340 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

2. Два паслядоўных гукі адчуваюцца намі раздзельна толькі ў тым выпадку, калі яны аддзелены прамежкам не менш $\frac{1}{10}$ секунды. Вызначыць найменшую адлегласць да перашкоды, на якой назіральнік зможа пачуць рэха. Скорасць гуку ў паветры прыняць роўнай $340 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

3. Паляўнічы пачуў рэха зробленага ім выстралу праз $4 \frac{1}{2}$ секунды. На якой адлегласці знаходзіцца паверхня, адбіваючая гук?

4. Вызначыць даўжыні гукавых хваль у паветры пры 0°С самага нізкага і самага высокага тону раяля.

5. Скорасць гуку ў чыгуне была вызначана ўпершыню ў Парыжы наступным чынам. З чыгуннай водаправоднай трубы была выпушчана вада; у адным канцы трубы білі ў звон; у другім канцы назіральнік чуў два гукі: спачатку адзін, што прыйшоў па чыгуне, потым другі, што прыйшоў па паветры. Даўжыня трубы была 931 м, а прамежак часу паміж прыходам гукаў быў ровен $2 \frac{1}{2}$ сек. Знайсці адсюль скорасць гуку ў чыгуне; скорасць гуку ў паветры прыняць роўнай $340 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

¹ Тлумачэнне прынцыпу магнітнага гуказапісу можа быць дадзена толькі пасля вывучэння курса электрамагнетызму ў Х класе.

РАЗДЗЕЛ IV.

РУХ ВАДКАСЦІ І ГАЗУ.

48. Ціск. Сіла ціску. Механічнае дзеянне вадкасцей і газаў на паверхні цел, напрыклад на сценкі сасудаў, характарызуецца велічыняй, якая называецца ціскам. Паняцце ціску з'яўляецца адным з асноўных у механіцы вадкасцей і газаў.

Ціскам называецца велічыня, якая вымяраецца адносінай сілы, дзеючай на паверхню, да плошчы гэтай паверхні.

Сіла ціску, як і ўсякая іншая сіла, з'яўляецца вынікам узаемадзеяння цел; у любых выпадках, ці гэта будзе ціск цел на апоры, вадкасцей на сценкі сасудаў або атмасфернага паветра на зямлю, мы маем справу з узаемадзеяннем цел.

Сілы ціску могуць быць размеркаваны па плошчы як раўнамерна, так і нераўнамерна. У выпадку раўнамернага размеркавання сіл ціску на ўсіх участках паверхні ціск аднолькавы. У гэтым выпадку ціск можна разлічыць па формуле:

$$p = \frac{F}{S},$$

дзе p — ціск, F — сіла ціску і S — плошча.

Калі, напрыклад, на поршань гідраўлічнага прэса плошчай 50 см^2 дзейнічае сіла ў 200 кГ , то на кожны квадратны сантыметр дзейнічае сіла ў 4 кГ і ціск $p = 4 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$.

За адзінку ціску прымаецца такі ціск, пры якім на адзінку плошчы дзейнічае адзінка сілы.

Прыняўшы за адзінку сілы 1 дыну, за адзінку плошчы 1 см^2 , атрымаем адзінку ціску ў сістэме CGS: $1 \frac{\text{дн}}{\text{см}^2} (1 \text{ бар})$. Часта за адзінку ціску прымаецца нармальная атмасфера, роўная ціску ртутнага слупа вышыняй ў 760 мм пры 0°C . Гэты ціск ровен сіле, з якой ртутны слуп вышыняй 760 мм пры 0°C цісне на 1 см^2 паверхні. Ён лікава ровен вазе дадзенага слупа ртуці сячэннем у 1 см^2 .

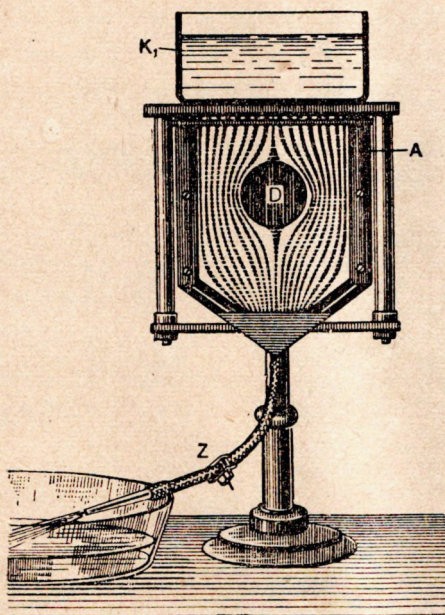
Ведаючы, што ўдзельная вага ртуці роўна $13,59 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$, выразім нармальную атмасферу праз ціск у $\frac{\Gamma}{\text{см}^2}$:

$$p = 76 \text{ см} \cdot 13,59 \frac{\Gamma}{\text{см}^3} \approx 1033 \frac{\Gamma}{\text{см}^2} = 1,033 \frac{\kappa\Gamma}{\text{см}^2}.$$

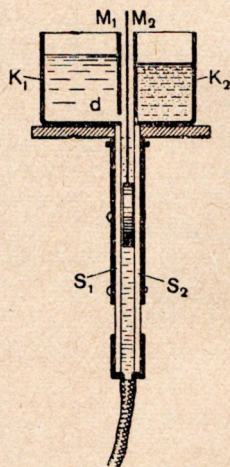
У тэхніцы за адзінку ціску звычайна прымаюць $1 \frac{\kappa\Gamma}{\text{см}^2}$ — гэтая тэхнічная атмасфера.

Ведаючы велічыню ціску і плошчу паверхні, па формуле $p = \frac{F}{S}$ можна знайсці сілу ціску: $F = p \cdot S$.

49. Назіранне руху вадкасці. Пад дзеяннем розных сіл вадкасці і газы могуць знаходзіцца або ў раўнавазе, або ў руху. Законы раўнавагі вадкасцей і газаў былі вывучаны ў пачатковым курсе фізікі, цяпер жа мы разгледзім некаторыя з'явы, звязаныя з іх рухам.



а



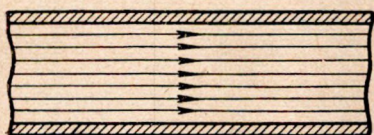
б

Рис. 87. Прибор для назірання руху вадкасці: а — выгляд сперад; б — выгляд збоку.

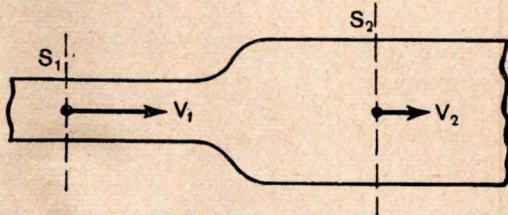
Нягледзячы на розніцу паміж вадкасцямі і газамі, некаторыя законы іх руху аднолькавыя. Гэтая акалічнасць вельмі спрыяльная таму, што рух вадкасці лягчэй зрабіць прыкметным і, значыць, лягчэй вывучыць, чым рух газаў.

Для даследавання руху вадкасці прымяняюцца спецыяльныя прыборы. На рис. 87, а паказан выгляд аднаго такога прыбора спераду, а на рис. 87, б — збоку.

Прыбор складаецца з плоскага шклянога сасуда A (рыс. 87, а), утворанага дзвюма шклянымі пласцінкамі S_1 і S_2 (рыс. 87, б), адлегласць паміж якімі парадку 1 мм. Зверху да гэтых шкляных пласцінак шчыльна падагнаны металічныя пласцінкі M_1, M_2 , да якіх прымацаваны камеры K_1 і K_2 . Кожная камера злучаецца з прасторай паміж пласцінкамі радаю адтулін, прасвідраваных у пласцінках M_1 і M_2 . (Адна такая адтуліна d паказана ў пласцінцы M_1 .) Адтуліны ў гэтых пласцінках ссунуты адна адносна другой.



Рыс. 88. У трубе аднолькавага сячэння па ўсёй даўжыні лініі току паралельны адна другой і размеркаваны аднолькава густа.



Рыс. 89. Пры стацыянарным цячэнні скорасці руху частачак вадкасці адваротна прапарцыянальны плошчам сячэння трубы.

У камеру K_1 наліваецца чыстая вада, а ў камеру K_2 — вада, падфарбаваная чарнілам.

У пачатку доследу ўзровень вады ў камеры K_1 крыху вышэйшы, чым у камеры K_2 . Калі адкрыць запіскны кран Z , які закрывае гумавую трубку для адводу вады (рыс. 87, а), то ў прастору паміж шклянымі пласцінкамі S_1, S_2 пацячэ спачатку чыстая вада з камеры K_1 . Але як толькі ўзроўні вады ў камерах зраўнуюцца, у прыбор пачне пранікаць і падфарбаваная вада ў выглядзе тонкіх афарбаваных струменьчыкаў. Гэтыя струменьчыкі размяшчаюцца ўздоўж ліній, якія называюцца лініямі току.

Калі змясціць у сярэдзіну паміж пласцінкамі S_1, S_2 круглы дыск D , які ўяўляе сабой сячэнне шара або цыліндра, то можна назіраць карціну ліній току вакол гэтага цела. Такая карціна паказана на рыс. 87, а.

Пры дапамозе ліній току можна графічна паказваць велічыню скорасці цячэння вадкасці і газу. **У тых месцах, дзе скорасць большая, лініі току праводзяцца гусцей і, наадварот, дзе скорасць меншая, лініі току праводзяцца радзей.**

50. Стацыянарны рух вадкасці. Калі па трубе цячэ вадкасць бесперапынным струменем, то праз любое папярочнае сячэнне трубы ў кожны момант часу праходзіць аднолькавая колькасць вадкасці. Такі рух вадкасці называецца стацыянарным¹ (устанавіўшымся) рухам.

Стацыянарны рух можа мець месца ў рэках, у водаправодных трубах або пры выцяканні вады з вялікага рэзервуара.

¹ Стацыянарны (ад лац. стацыянарус) — пастаянны, нязменлівы.

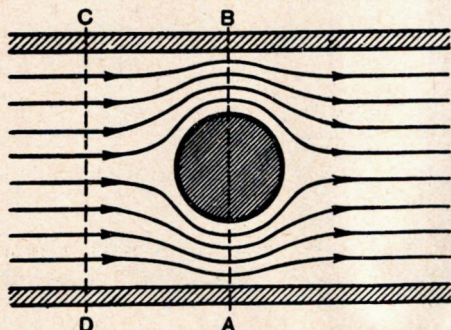
У трубе аднолькавага сячэння па ўсёй яе даўжыні скорасці руху частачак вадкасці аднолькавыя (пры адсутнасці трэння); таму лініі току паралельны адна другой і размеркаваны ўсюды аднолькава густа (рыс. 88). Пры руху ж уздоўж трубы з неаднолькавым сячэннем скорасці гэтыя розныя.

Абазначым скорасць цячэння вадкасці ў сячэнні S_1 трубы праз v_1 , а ў сячэнні S_2 — праз v_2 (рыс. 89). Пры ўстанавіўшымся цячэнні колькасць вады, якая працякае ў 1 сек праз папярочнае сячэнне трубы S_1 , роўна колькасці вады, якая працякае праз сячэнне S_2 гэтай жа трубы; таму мож-
на напісаць:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2,$$

адкуль вынікае, што $\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}$,

г. зн. *пры стацыянарным цячэнні скорасці руху частачак вадкасці адваротна прапарцыянальны плошчам сячэння трубы.*



Рыс. 90. Размеркаванне ліній току пры абцяканні вадкасцю цыліндра.

На рыс. 90 паказана абцяканне вадкасцю цыліндра.

Пры сустрэчы з цыліндрам лініі току выгінаюцца. У сячэнні CD скорасць частачак вадкасці меншая, лініі току тут радзейшыя. У сячэнні ж AB скорасці частачак вадкасці большыя і лініі току гусцейшыя. Усё выкладзенае адносіцца ў роўнай ступені і да руху газаў.

Практыкаванне 13.

1. У якіх месцах ракі цячэнне больш хуткае: у вузкіх або шырокіх? Растлумачце, чаму.
2. На падставе якіх прыкмет можна лічыць цячэнне вады ў рацэ стацыянарным? Ці заўсёды гэта бывае?
3. Чаму нельга паток людзей, якія выходзяць з тэатра або кіно пасля заканчэння прадстаўлення ці карціны, лічыць устанавіўшымся?

51. Ціск у рухаючайся вадкасці. У цякучай вадкасці адрозніваюць статычны ціск і дынамічны ціск. Прычынай статычнага ціску, як і ў выпадку нерухомай вадкасці, з'яўляецца сцісканне вадкасці. Статычны ціск праяўляецца ў напоры вадкасці на сценку трубы, па якой цячэ вадкасць.

Дынамічны ціск абумоўліваецца скорасцю цячэння вадкасці. Каб выявіць гэты ціск, трэба затармазіць вадкасць, і тады ён, як і статычны ціск, праявіцца ў выглядзе напору.

Сума статычнага і дынамічнага ціску называецца поўным ціскам.

У вадкасці ў стане спакою дынамічны ціск роўны нулю, значыць, статычны ціск роўны поўнаму ціску і можа быць вымеран любым манометрам.

Вымярэнне ціску ў рухаючайся вадкасці звязана з цэлым радам цяжкасцей. Справа ў тым, што манометр, апушчаны ў рухаючуюся вадкасць, змяняе скорасць руху вадкасці ў тым месцы, дзе ён знаходзіцца. Пры гэтым, вядома, змяняецца і велічыня вымяраемага ціску. Каб манометр, апушчаны ў вадкасць, зусім не змяняў скорасці вадкасці, ён павінен рухацца разам з вадкасцю. Аднак вымераць такім шляхам ціск унутры вадкасці вельмі нязручна. Гэтую цяжкасць абыходзяць, надаючы трубцы, злучанай з манометрам, абцякальную форму, пры якой яна амаль не змяняе скорасці руху вадкасці (рис. 91).

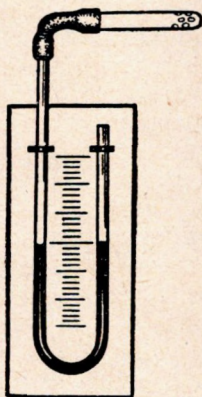


Рис. 91. Трубка абцякальнай формы злучана з манометрам.

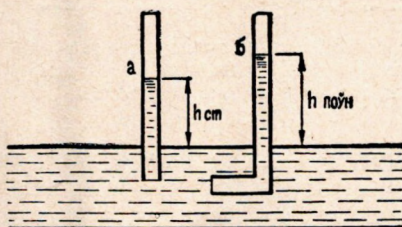


Рис. 92. Вымярэнне ціску ў рухаючайся вадкасці.

Практычна для вымярэнняў ціску ўнутры рухаючайся вадкасці або газу ўжываюць вузкія манаметрычныя трубкі (рис. 92, а).

Статычны ціск вымяраецца з дапамогай манаметрычнай трубкі, плоскасць адтуліны якой размешчана паралельна лініям току так, як паказана на рис. 92, а. Калі вадкасць у трубе знаходзіцца пад ціскам, то ў манаметрычнай трубцы вадкасць падывецца на некаторую вышыню, якая адпавядае статычнаму ціску ў дадзеным месцы трубы.

Поўны ціск вымяраюць трубкой, плоскасць адтуліны якой размешчана перпендыкулярна лініям току (рис. 92, б). Такі прыбор называецца трубкой Піто. Папаўшы ў адтуліну трубкі Піто, вадкасць спыняецца. Вышыня слупа вадкасці ($h_{\text{поўн.}}$) у манаметрычнай трубцы будзе адпавядаць поўнаму ціску вадкасці ў дадзеным месцы трубы.

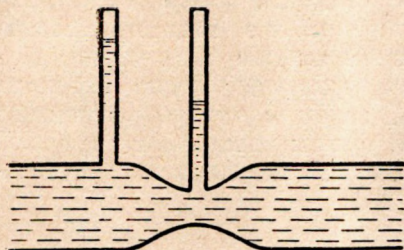
У далейшым нас будзе цікавіць толькі статычны ціск, які мы будзем называць проста ціскам унутры рухаючыхся вадкасці або газу.

Калі вымераць ціск у рухаючайся вадкасці ў розных частках трубы пераменнага сячэння (рис. 93), то выявіцца, што ў вузкай частцы трубы ён меншы, чым у шырокай яе частцы.

Але скорасці цячэння вадкасці адваротна прапарцыянальны плошчам сячэння трубы; значыць, ціск у рухаючайся вадкасці залежыць ад скорасці яе цячэння.

У месцах, дзе вадкасць рухаецца хутчэй (вузкія месцы трубы), ціск меншы, чым там, дзе гэтая вадкасць рухаецца больш павольна (шырокія месцы трубы).

Гэты доследны факт можна растлумачыць на аснове агульных законаў механікі.



Рыс. 93. Ціск у рухаючайся вадкасці ў вузкай частцы канала меншы за ціск у шырокай яго частцы.

Дапусцім, што вадкасць пераходзіць з шырокай часткі трубі ў вузкую. Пры гэтым частачкі вадкасці павялічваюць скорасці, г. зн. рухаюцца з паскарэннямі ў напрамку руху. Выключаючы з разгляду трэнне, на аснове другога закону Ньютана можна сцвярджаць, што раўнадзеючая сіл, якія дзейнічаюць на кожную частачку вадкасці, таксама накіравана ў бок руху вадкасці. Але гэтая раўнадзеючая

сіла ствараецца рознасцю ціскаў, якія дзейнічаюць на кожную дадзеную частачку з боку акружаючых яе частчак вадкасці, і накіравана ўперад, па напрамку руху вадкасці. Значыць, ззаду на частачку дзейнічае большы ціск, чым спераду. Такім чынам, як паказвае і дослед, ціск у шырокай частцы трубі току большы, чым у вузкай.

Калі вадкасць цячэ з вузкай у шырокую частку трубі, то, відавочна, у гэтым выпадку частачкі вадкасці тармозяцца. Раўнадзеючая сіл, якія дзейнічаюць на кожную частачку вадкасці з боку акружаючых яе частчак, накіравана ў бок, процілеглы руху. Гэтая раўнадзеючая ўяўляе сабой рознасць ціскаў у вузкім і шырокім каналах. Значыць, частачка вадкасці, пераходзячы з вузкай у шырокую частку трубі, рухаецца з месц з меншым ціскам у месцы з большым ціскам.

Такім чынам, **пры стацыянарным руху ў месцах звужэння каналаў ціск вадкасці паніжан, у месцах расшырэння — павышан.**

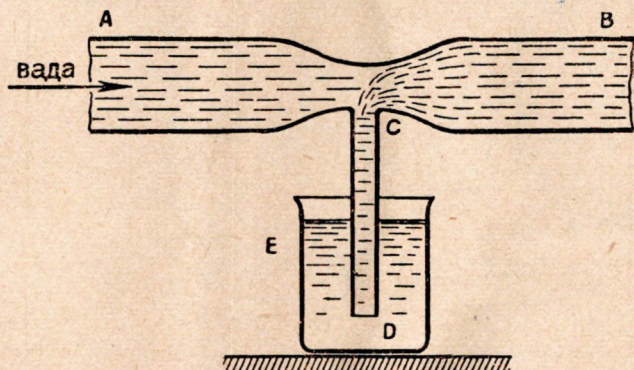
Графічна, як было ўказана ў § 49, скорасці цячэння вадкасці прынята паказваць гушчынёй размяшчэння ліній току. Таму ў тых частках стацыянарнага патоку вадкасці, дзе ціск меншы, лініі току павінны быць размешчаны гусцей і, наадварот, дзе ціск большы, лініі току размешчаны радзей. Тое ж адносіцца і да паказу патоку газу.

52. Усасваючае дзеянне струменя вадкасці і яго практычнае выкарыстанне. Звужаючы ў якім-небудзь месцы папярочнае сячэнне трубі, па якой цячэ вадкасць або газ, можна зрабіць статычны ціск у гэтым месцы значна меншым за атмасферны. Усасваючая сіла, якая пры гэтым атрымліваецца, можа быць выкарыстана ў тэхніцы пры будове некаторых прыбораў.

Уяўленне аб прынцеце дзеяння такіх прыбораў дае ўстаноўка, паказаная на рыс. 93а.

Да шклянй трубки *AB*, у яе вузкім сячэнні, прыпаяна манаметрычная трубочка *CD*, свабодны канец якой *D* апушчан у сасуд *E* з падфарбаванай вадой. Злучаючы трубку *AB* з водаправодам, ствараюць у ёй паток вадкасці. Пры пэўнай скорасці цячэння вадкасці ціск у вузкай частцы трубки *AB* робіцца меншым за атмасферны; пры гэтым падфарбаваная вадкасць з сасуда *E* падымаецца ўверх па трубочцы *CD* і ўліваецца ў паток вадкасці, якая цячэ па *AB*.

Важнае прымяненне ўсасваючае дзеянне струменя знаходзіць у карбюратары — прыборы, прызначаным для жыўлення рухавіка унутранага згарання гаручай сумессю (будова рухавікоў будзе разгледжана ў § 130). Будова карбюратара паказана на рыс. 94а.



Рыс. 93а. Устаноўка для назірання ўсасваючага дзеяння струменя вадкасці.

У час усасваючых ходаў поршня знадворнае паветра праходзіць знізу ўверх па трубе *B*, якая мае звужаную частку — дыфузар. У дыфузары змешчана трубочка *C* (жыклёр), праз якую паступае бензін з паплаўковай камеры *D*¹.

Паплаўковая камера і жыклёр — сазлучаныя сасуды. Калі ўзровень бензіну ў камеры ніжэйшы або роўны вышыні жыклёра, то бензін не выліваецца. Але калі паветра праходзіць праз дыфузар, ціск каля жыклёра памяншаецца; утвараецца рознасць ціскаў паветра ў паплаўковай камеры (там ён роўны атмасфернаму) і ў дыфузары. Пад дзеяннем рознасці ціскаў бензін выштурхоўваецца з жыклёра і распыляецца ў патоку паветра, утвараецца рабочая сумесь, якая ўцягваецца праз рэгулюючую паток засланку *E* ў цыліндр рухавіка. Аб тым, якія працэсы адбываюцца ў рухавіку, будзе расказана ў § 130.

На рыс. 94б паказана схема будовы водаструменнага насоса, дзе таксама выкарыстоўваецца ўсасваючае дзеянне струменя вадкасці. Вада з водаправода праходзіць праз вузкі ўчастак трубки *A*, у якім ско-

¹ Звярніце ўвагу на будову паплаўковай камеры. Чым вышэйшы ўзровень бензіну ў камеры, тым вышэй падымаецца паплавок *K* і тым ніжэй апускаецца іголка *M* што закрывае адтуліну праз якую паступае ў камеру бензін. Такім чынам аўтаматычна падтрымліваецца патрэбны ўзровень бензіну ў камеры.

расць яе руху моцна ўзрастае, з прычыны чаго ціск робіцца меншым за атмасферны. Дзякуючы гэтаму праз трубку, злучаную з паветраным рэзервуарам, засасваецца паветра да таго часу, пакуль яго ціск

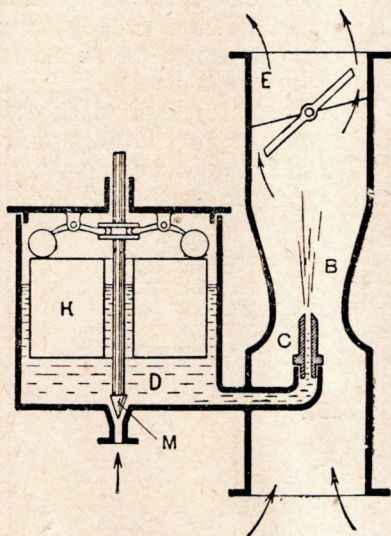


Рис. 94а. Будова карбюратора.

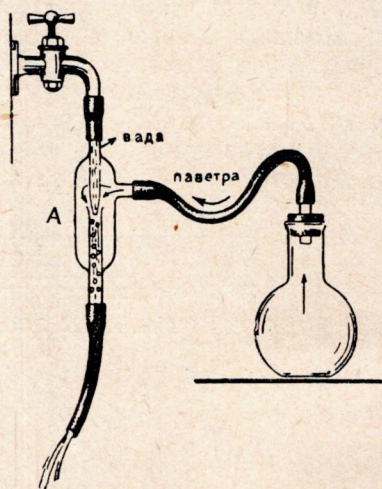


Рис. 94б. Схема будовы водаструменнага насоса.

у рэзервуары не становіцца роўным ціску ў звужанай частцы трубка А. Эвакуіраванае з рэзервуара паветра ўносіцца працякаючай вадой.

Практыкаванне 14.

1. Падвесьце дзве кансервавыя бляшанкі з вадой на доўгіх нітках, размясціўшы іх на адлегласці 1—2 см адна ад другой. Затым моцна падзьміце паміж імі, бляшанкі пры гэтым прыцягнуцца адна да другой. Растлумачце паводзіны бляшанак.

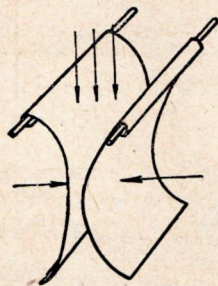


Рис. 95. Да практыкавання 2, § 52.

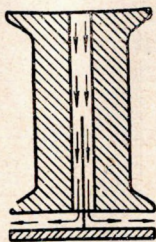


Рис. 96. Да практыкавання 3, § 52.

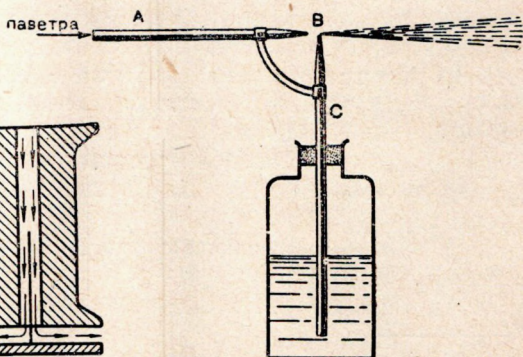


Рис. 97. Схема будовы пульверызатара.

2. Вазьміце два прамавугольныя кавалкі жорсткай паперы і, выгнуўшы іх, як паказана на рыс. 95, павесьце на вязальныя пруткі. Затым падзьміце паміж гэтымі кавалкамі паперы зверху. Кавалкі паперы пры гэтым будуць збліжацца.

Прарабіце дослед і растлумачце назіраемую з'яву.

3. Зрабіце невялікі лёгкі кардонны кружок. Наблізьце да гэтага кружка катушку, як паказана на рыс. 96, і моцна падзьміце ў адтуліну катушкі. Вы заўважыце, што кружок прыцягнецца да катушкі.

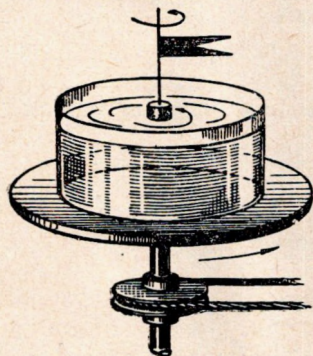
Прарабіце такі дослед і растлумачце назіраемую з'яву.

4. На рыс. 97 паказан прыбор, які называецца пультэрызатарам. Калі ўдзімаць у трубку А паветра, то вадкасць па трубцы СВ будзе падымасца і пры выхадзе з трубка распаляцца.

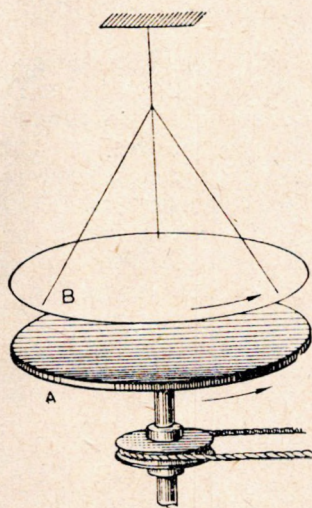
Зрабіце самі такі прыбор, прапрабіце з ім дослед і растлумачце яго дзеянне.

53. Унутранае трэнне ў вадкасцях і газах. Мы ведаем, што калі адно цела слізганіць або коціцца па паверхні другога, то ўзнікае сіла трэння, якая тармазіць рух цела.

Калі абодва сутыкаючыся целы рухаюцца, то сіла трэння запавольвае скорасць аднаго цела, якое рухаецца хутчэй, і павялічыць скорасць другога, якое рухаецца больш павольна.



Рыс. 98. Устаноўка для назірання ўнутранага трэння ў вадкасцях.



Рыс. 99. Устаноўка для назірання ўнутранага трэння ў газах.

Можна на доследзе пераканацца, што і паміж слямі газу і вадкасці, якія рухаюцца адзін адносна другога, таксама ўзнікаюць сілы, запавольваючы рух адных слаёў і паскараючы рух другіх. Гэтыя сілы называюць сіламі ўнутранага трэння або сіламі вязкасці.

Унутранае трэнне ў вадкасці можна назіраць пры дапамозе ўстаноўкі, паказанай на рыс. 98. На паверхні вады, налітай у шырокі сасуд, плавае невялікі драўляны цыліндр з флажком. Калі прывесці ў вярчэнне сасуд, то, з прычыны ўнутранага трэння, праз некаторы час прыйдзе ў вярчэнне і цыліндр з флажком. Пры спыненні сасуда цыліндр у выніку інерцыі будзе працягваць рух, але існуючыя ў вадкасці сілы ўнутранага трэння паступова паменшаць яго скорасць да нуля. Аналагічна можна выявіць наяўнасць унутранага трэння

ў газах (рыс. 99). Калі вярцець дыск *A*, то неўзабаве прыходзіць у рух і верхні дыск *B*, які нерухома вісеў над першым дыскам.

Дыск, што верціцца, уцягвае ў рух прыстаўшы да яго паверхні слой паветра, які, дзякуючы ўнутранаму трэнню газу, прыводзіць у рух больш аддаленыя слаі газу. Такім шляхам рух бесперапынна перадаецца ад слоя да слоя і, нарэшце, захоплівае верхні дыск, і ён прыходзіць у рух.

Практыкаванне 15.

1. У якім месцы трубы пераменнага сячэння бягучая вада рухаецца з найбольшай скорасцю, у якім з найменшай?

2. Дзе скорасць вады ў рацэ большая: каля берагоў або пасярэдзіне ракі? Паблізу да паверхні вады або на глыбіні? Растлумачце, чаму.

3. Якая з вадкасцей больш вязкая: вада ці гліцэрын? Адкаж абгрунтаўце.

54. Супраціўленне пры руху цела ў вадкасці і газе. З практыкі мы ведаем, што калі цела рухаецца ў вадкасці, то апошняя тармозіць рух; значыць, пры гэтым узнікае сіла, якая перашкаджае руху цела. Калі, напрыклад, з берага спакойнага возера штурхнуць у ваду лодку, то яна з прычыны інерцыі пройдзе некаторую адлегласць, а затым спыніцца. Сіла супраціўлення вады, якая дзейнічае на лодку, спыняе яе. У аднолькавай ступені гэта адносіцца да руху цела ў газе, напрыклад да руху аўтамабіля, веласіпеда, самалёта і іншых цел у паветры.

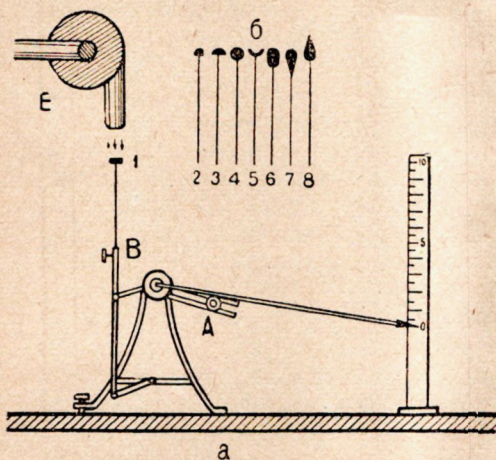


Рис. 100. Аэрадынамічны вагі.

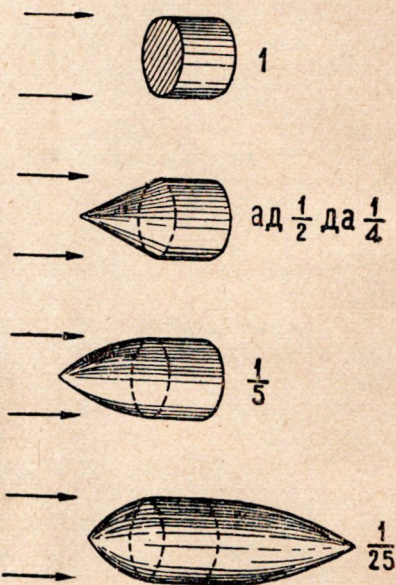


Рис. 101. Уплыў формы цела на велічыню аэрадынамічнага супраціўлення.

Сілу, якая перашкаджае руху цела ў паветры, называюць аэрадынамічным (паветраным) супраціўленнем. Устаноўлена, што велічыня аэрадынамічнага супраціўлення не залежыць ад таго, ці рухаецца цела ў паветры або, наадварот, нерухомае цела абцякаецца паветрам.

Высветлім, ад чаго залежыць велічыня аэрадынамічнага супраціўлення. Для гэтага выкарыстаем устаноўку, паказаную на рис. 100, *а*.

Асноўнай часткай нашай устаноўкі з'яўляюцца спецыяльнай канструкцыі аэрадынамічныя вагі. У стрыжні вагаў *В* ёсць гнездо, куды ўстаўляюцца цэлы розных форм і размераў. Прывядзенне ўказальніка вагаў да нуля ў пачатку доследу робіцца шляхам перасоўвання грузу *А*. Рух паветра ствараецца асобым электрычным вентылятарам *Е*.

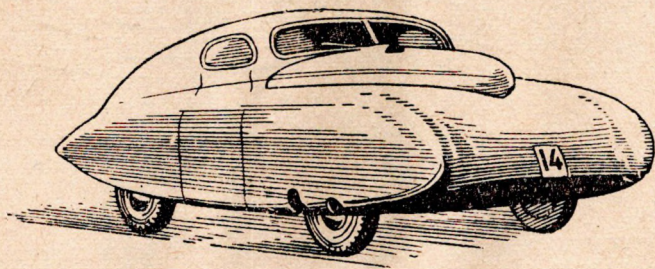


Рис. 102. Абцякальнай формы гоначны аўтамабіль.

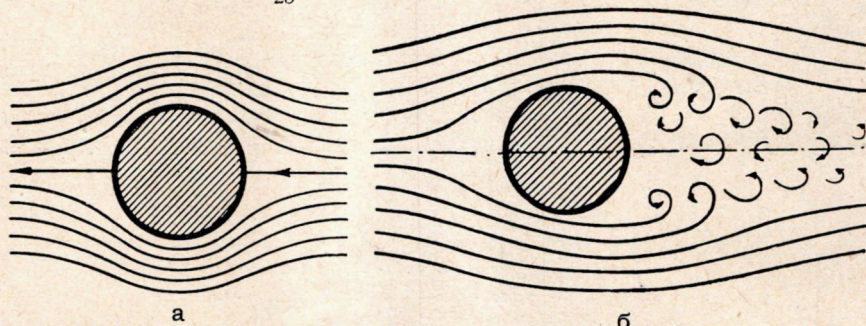
Змяняючы сілу току ў электрарухавіку, можна атрымліваць патокі паветра рознай скорасці. Цэлы 1—8 (рис. 100, *б*), супраціўленне якіх даследуецца, маюць аднолькавую вагу. Усе яны, за выключэннем цела 2, маюць аднолькавую лабавую плошчу (плсшча найбольшага сячэння цела ў напрамку, перпендыкулярным руху).

Умацаваўшы ў гнездзе вагаў *В* круглы дыск 1 і змяняючы скорасць патоку паветра, можна паказаць, што супраціўленне будзе тым большае, чым большая скорасць патоку паветра. Правёўшы такія ж дослед з дыскам меншага дыяметра, устаўляваем, што пры аднолькавых скорасцях паветра супраціўленне дыска меншага памеру будзе меншым; супраціўленне шара меншае, чым супраціўленне дыска такога ж дыяметра, нягледзячы на тое, што іх лабавая плошча аднолькавая. Асабліва вялікім будзе супраціўленне паўшара, павернутага ўвагнутым бокам насустрач патоку. Таму форма паўшара выкарыстоўваецца ў парашутах.

Усе гэтыя доследы дазваляюць зрабіць вывад, што аэрадынамічнае супраціўленне залежыць ад скорасці паветра адносна цела, ад формы цела і ад велічыні лабавой плошчы.

Уплыў формы цела на велічыню аэрадынамічнага супраціўлення наглядна паказан на рис. 101. За адзінку прынята супраціўленне цыліндра. Конусападобная насадка да яго памяншае супраціўленне

ад $\frac{1}{2}$ да $\frac{1}{4}$, у залежнасці ад вугла конуса. Гранатападобная насадка даводзіць супраціўленне да $\frac{1}{5}$. Нарэшце, калі надаць цыліндру форму, блізкую да формы падаючай кроплі або рыбы, то супраціўленне паніжаецца да $\frac{1}{25}$.



Рыс. 103. Абцяканне цыліндра вадкасцю: *а* — пры малых скорасцях абцякання; *б* — пры павелічэнні скорасці абцякання вадкасць ззаду цыліндра прыходзіць у кругавы віхравы рух.

55. Абцяканне цела вадкасцю або газам. Найбольш лёгкаабцякальным целам з'яўляецца такое цела, якое пры дадзенай лабавай плошчы мае найменшае супраціўленне.

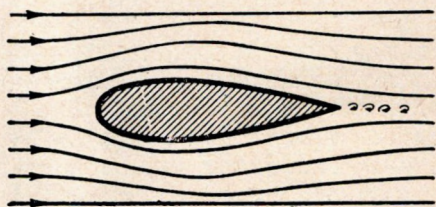
Форма цела, закругленага спераду і заостранага ззаду, як мага больш гладкая, без выступу, з'яўляецца найбольш лёгкаабцякальнай. Такую форму надаюць снарадам, падводным лодкам, тарпедам, гоначным аўтамабілям, корпусу і крыллям самалёта, падводным часткам суднаў.

На рыс. 102 паказан лёгкаабцякальны аўтамабіль.

Высветлім цяпер, якімі фізічнымі працэсамі вызначаецца памяншэнне супраціўлення цела, якому нададзена лёгкаабцякальная форма.

Для гэтага будзем змяшчаць у патоку вадкасці цела рознай формы і, мяняючы скорасць патоку, назіраць карціны ліній току, якія атрымаліся пры абцяканні вадкасцю гэтых цел.

На рыс. 103 паказана карціна ліній току вадкасці, якая атрымалася пры абцяканні ёю цыліндра з рознай скорасцю. Пры малых скорасцях абцякання (рыс. 103, *а*) лініі току, абышоўшы цыліндр, размяшчаюцца ззаду яго такім жа чынам, як і перад ім. Па меры ж павелічэння скорасці абцякання вадкасць ззаду цыліндра прыходзіць у кругавы віхравы рух (рыс. 103, *б*).



Рыс. 104. Лініі току вакол цела лёгкаабцякальнай формы. Ззаду гэтага цела віхры амаль не ўтвараюцца.

Вадкасць, якая верціцца ў віхры, рухаецца хутчэй вадкасці ў стацыянарным патоку. Але мы ведаем (§ 52), што ціск у вадкасці тым меншы, чым хутчэй яна рухаецца (успомніце ўсасваючае дзеянне струменя вадкасці). Значыць, з задняга боку цыліндра, дзе ўтварыліся віхры, ціск робіцца меншым, чым з пярэдняга. Рознасць ціскаў спераду і ззаду рухаючагася цела і стварае супраціўленне руху цела.

Да гэтага супраціўлення далучаецца яшчэ супраціўленне, абумоўленае ўнутраным трэннем; яно выяўляецца ў тым, што цела, якое рухаецца, цягне за сабою слаі вадкасці. Аднак вымярэнні паказваюць, што гэтае супраціўленне малое, і пры вялікіх скорасцях істотнага значэння яно не мае.

Такім чынам, *галоўнейшай прычынай, якая абумоўлівае супраціўленне вадкасці руху цела, з'яўляецца ўтварэнне віхраў ззаду рухаючагася цела*. Таму для памяншэння гэтага супраціўлення трэба надаць целу такую форму, пры якой завіхрэнне вадкасці атрымліваецца найменшым.

Цела лёгкаабцякальнай формы мае вельмі малое супраціўленне таму, што вадкасць усюды прылягае да яго паверхні і ззаду яго не завіхрана.

На рис. 104 паказана карціна ліній току вакол цела лёгкаабцякальнай формы. Ззаду такога цела віхры амаль не ўтвараюцца.

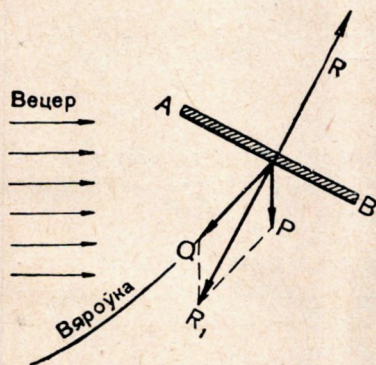


Рис. 105. Сілы, дзеючыя на папярковы змей AB пры яго палёце.

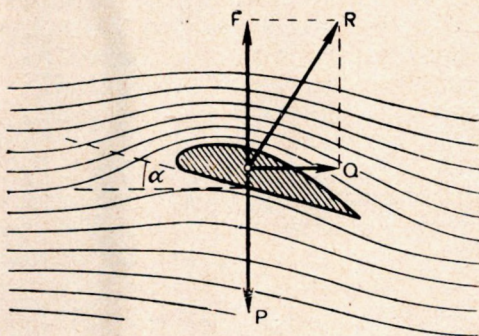


Рис. 106. Да ўзнікнення пад'ёмнай сілы крыла самалёта.

56. Пад'ёмная сіла. Пры руху цел у паветры, апрача супраціўлення руху, узнікаюць і іншыя сілы. Асабліва важнае значэнне мае так званая пад'ёмная сіла.

Птушка свабодна ляціць у паветры. Падстрэленая, яна каменем падае на зямлю. Чаму? Якая сіла ўтрымлівае птушку ў паветры?

Гэтае пытанне з самых старажытных часоў цікавіла чалавека. Людзі даўно марылі аб штучных крыллях, якія дазволілі б ім, падобна

птушкам, свабодна перасякаць вялікія прасторы за кароткія прамежкі часу. Аднак прайшло многа часу, перш чым гэтая мара знайшла сваё ўвасабленне ў самалёце.

Перш чым разглядаць пытанне аб пад'ёмнай сіле крыла самалёта, звернемся да простага прыкладу, які выразна паказвае, як наогул можа ўзнікнуць пад'ёмная сіла пры руху цела ў паветры. Паглядзім, якія сілы дзейнічаюць на папярковы змей, што ўтрымліваецца на ветры выроўкай (рыс. 105).

Паветраны паток, адбіваючыся ад паверхні змея AB , дзейнічае на яго з сілай R . Апрача таго, на змей дзейнічаюць сіла яго ўласнай вагі P і нацяжэнне выроўкі Q ; рэзультуючая гэтых сіл R_1 . Пры роўнасці сіл R і R_1 змей трымаецца ў паветры; калі ж сіла R будзе большая R_1 , то змей будзе падымацца. Такім чынам, паветраны змей, адхіляючы гарызантальны паток паветра коса ўніз, сам адчувае з боку паветра сілу, якая накіравана ўгору і забяспечвае яго палёт.

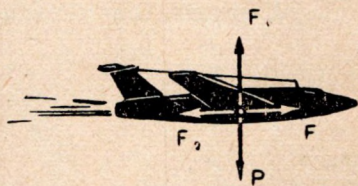
Значна больш складана і інакш, чым у выпадку са змеем, быглядае справа з пад'ёмнай сілай, дзеючай на крыло самалёта пры яго палёце.

Сцяжэнне крыла самалёта паказана на рыс. 106. Практыка паказала, што для ажыццяўлення пад'ёму крыло самалёта павінна быць размешчана так, каб меўся некаторы вугал α паміж яго ніжняй лініяй і напрамкам палёту¹. Пры гарызантальным палёце вугал α не перавышае $1-1,5^\circ$, пры пасадцы — каля 15° . Аказваецца, што пры наяўнасці такога вугла скорасць патоку паветра, якое абцякае крыло зверху, будзе большай, чым скорасць патоку, які абцякае ніжнюю паверхню крыла. На рыс. 106 гэтая рознасць скорасцей адзначана рознай гушчынёй ліній току.

Але, як указвалася ў § 51, у тым месцы патоку, дзе скорасць большая, ціск меншы, і наадварот. Таму пры руху самалёта ў паветры на верхняй паверхні крыла будзе паніжаны ціск, а на ніжняй — павышаны ціск. Гэтая рознасць ціскаў і абумоўлівае дзеянне на крыло сілы R , накіраванай уверх (рыс. 106).

Вертыкальная складаючая гэтай сілы — сіла F — уяўляе сабой пад'ёмную сілу, накіраваную супраць вагі цела P . Калі гэтая сіла большая за вагу самалёта, апошні будзе падымацца ўверх. Другая складаючая Q уяўляе сабой лабавае супраціўленне; яно пераадольваецца цягай вінта.

На рыс. 107 паказаны сілы, якія дзейнічаюць на самалёт пры гарызантальным раўнамерным палёце. F_1 — пад'ёмная сіла, P — вага самалёта, F_2 — лабавае супраціўленне самалёта і F — сіла цягі вінта.



Рыс. 107. Сілы, дзеючыя на самалёт пры гарызантальным раўнамерным палёце.

¹ Гэты вугал змяняецца дзеяннем руля вышыні.

Канструяванне і разлік самалётаў робяцца на аснове аэрадынамічнай тэорыі. У распрацоўку гэтай тэорыі вялікі ўклад унеслі наш выдатны вучоны М. Я. Жукоўскі і яго вучні.

Жукоўскі Мікалай Ягоравіч (1847—1921) — выдатны рускі вучоны, заснавальнік сучаснай гідра- і аэрамаханікі, «бацька рускай авіяцыі» (так назваў яго У. І. Ленін). Ён даў формулу для вызначэння пад'ёмнай сілы самалёта, якая ляжыць у аснове разлікаў пры пабудове самалётаў. Жукоўскаму належаць важныя даследаванні заканамернасці руху вадкасцей, якія атрымалі шырокае практычнае прымяненне.

Яшчэ на заранку развіцця авіяцыі Жукоўскі гаварыў: «Чалавек не мае крыляў і па адносіне вагі свайго цела да вагі мускулаў у 72 разы слабейшы за птушку. Але я думаю, што ён паляціць, абавіраючыся не на сілу сваіх мускулаў, а на сілу свайго розуму» Прайшло нямнога часу, і гэтыя прарочыя словы спраўдзіліся.



Наша краіна шмат зрабіла для развіцця авіяцыі. Першы самалёт быў пабудаван рускім афіцэрам А. Ф. Мажаўскім. Сусветнае першынство ў галіне многіх авіяцыйных дасягненняў і ў цяперашні час належаць нашай радзіме.

Вялікае значэнне авіяцыя мае ў гаспадарчым жыцці краіны. Тысячы самалётаў лятаюць над нашай краінай, звязваючы самыя далёкія куткі яе з гаспадарчымі і культурнымі цэнтрамі краіны, перавоззячы грузы і пасажыраў.

Практыкаванне 16.

1. Зрабіце невялікі папяровы цыліндр даўжынёю 15—20 см і дыяметрам 4—5 см і прыклеіце да яго канцоў крыху большага дыяметра дыскі. Наматайце на цыліндр частку стужкі (даўжынёю 0,5—0,75 м), а свабодны канец стужкі прывяжыце да канца палачкі. Пакладзіце цыліндр на стол і хутка прарэжце канцом палачкі злева направа (рыс. 108). Цыліндр пакоцця па сталае, затым узляціць уверх і потым ужо ўпадзе.

Парабіце такі дослед і растлумачце ўзлёт цыліндра.

2. Пакладзіце цыліндр, апісаны ў папярэднім практыкаванні, на стол так, каб накручаная на цыліндр стужка пры рыўку цыліндра ў гарызантальным напрамку сыходзіла з яго не знізу, як на рыс. 108, а зверху. Прасачыце за рухам цыліндра, апішыце і растлумачце яго.

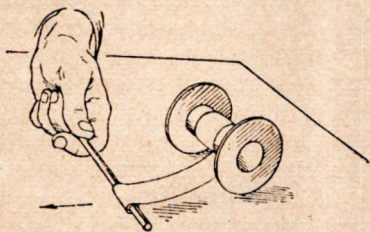
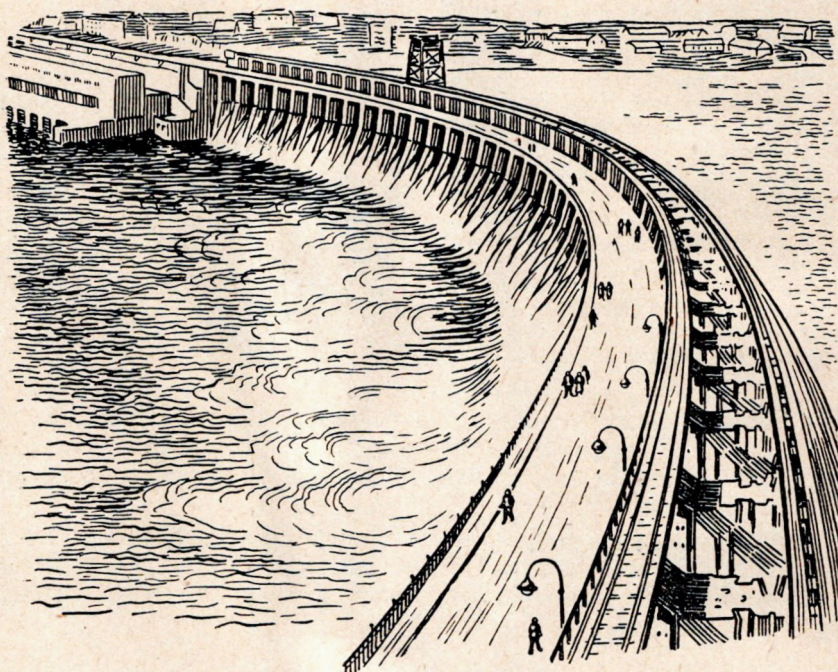


Рис. 108. Да практыкавання 16, § 56.

57. Выкарыстанне энергіі рухаючайся вады. Ужо многа тысяч год чалавецтва выкарыстоўвае энергію рухаючайся вады для самых разнастайных мэт.

Запасы воднай энергіі на Зямлі велізарныя. Па папярэдніх падліках толькі гідраэнергарэсурсы Савецкага Саюза вызначаюцца прыкладна ў 300 млн. кілават, што ў пераводзе на выпрацоўку электрычнай энергіі можа даць не менш 2000 млрд. кілават-гадзін штогод.



Рыс. 109. Пляціна Дняпроўскай гідраэлектрастанцыі імя У. І. Леніна.

Вялікім «кругаваротам вады» мы абавязаны сонечнаму спрамяненню. Вада азёр, мораў і акіянаў выпараецца і, узнімаючыся ўверх, утварае воблакі і хмары, з якіх яна ў выглядзе дажджу і снегу падае на паверхню зямлі і ў форме ручаёў, рэк і патокаў цячэ ў моры і акіяны, дзе зноў выпараецца. Кожны горны паток, кожны ручай, кожная рака ўтварае крыніцу энергіі, якая можа быць так ці інакш выкарыстана.

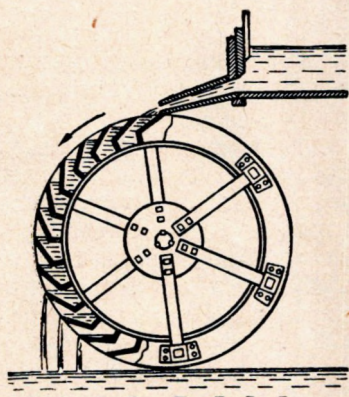
Нягледзячы на тое, што запасы воднай энергіі велізарныя і людзі пачалі карыстацца імі даўно, толькі ў апошні час водная энергія набыла велізарнае значэнне ў прамысловасці, атрымаўшы назву «белага вугалю». Асабліва вялікая ўвага праблеме выкарыстання энергіі «белага вугалю» ўдзелена ў Савецкім Саюзе.

Савецкі Саюз паставіў адной з першачарговых задач у галіне энергетыкі задачу максімальнага выкарыстання энергіі «белага вугалю» шляхам пабудовы магутных гідроэлектраўстановак на дзесяткі, сотні тысяч і нават мільёны кілават. І гэтая задача дзякуючы сацыялістычнаму ладу нашай краіны паспяхова вырашаецца. Ужо ў цяперашні час у нас дзейнічае рад буйнейшых гідроэлектрастанцый; галоўнейшай з іх з'яўляецца Дняпроўская гідроэлектрастанцыя імя У. І. Леніна магутнасцю ў 558 000 *квт*. У 1952 г. пушчана ў ход Цымлянская гідроэлектрастанцыя на Доне магутнасцю ў 160 000 *квт*. Завяршаецца будаўніцтва найвялікшых у свеце гідроэлектрастанцый на Волзе: Куйбышаўскай — магутнасцю ў 2 100 000 *квт* і Сталінградскай — магутнасцю ў 1 700 000 *квт*. Пабудаванне гэтых станцый дасць краіне новыя мільёны кілават-гадзін электрычнай энергіі. Пабудаваны і будуцца таксама магутныя гідроэлектрастанцыі на Ангарах, Каме, Іртышы, Енісеі, Обі і іншых рэках.

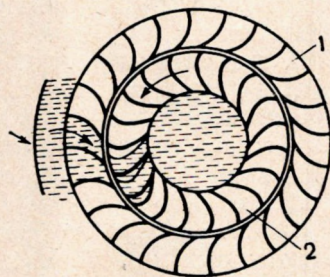
58. Гідроўлічныя рухавікі. Як вядома з механікі, кожнае цела, паднятае над зямлёй, уладае адносна паверхні Зямлі патэнцыяльнай энергіяй. Гэта ў аднолькавай ступені адносіцца і да вады.

Калі, напрыклад, ёсць які-небудзь запас вады m , паднятай адносна некаторага ўзроўню на вышыню h , то гэтая вада ўладае адносна гэтага ўзроўню патэнцыяльнай энергіяй mgh . Калі гэтая вада ўпадзе з вышыні h , то частачкі яе набудуць скорасць v , вызначаемую з роўнасці $v = \sqrt{2gh}$. Патэнцыяльная энергія вады пры гэтым ператвораецца ў кінетычную энергію $\frac{mv^2}{2}$. Калі ж не прымаць пад увагу нязначныя страты энергіі, непазбежныя пры гэтым пераходзе, то можна напісаць, што $mgh = \frac{mv^2}{2}$.

Магутнасць крыніцы вады залежыць не толькі ад вышыні h , з якой вада падае (вышыні напору), але і ад колькасці вады, якая прыцякае ў 1 сек. Калі, напрыклад, у адну секунду праходзіць Q m^3 вады, г. зн. $1000 Q$ $кг$, то гэтая вада, па-



Рыс. 110. Схема будовы наліўнога вадзянога кола.



Рыс. 111. Схема цягнення вады праз рэактыўную турбіну.

даючы з вышыні h , можа развіць магутнасць $\frac{1000 \cdot Q \cdot h}{75}$ к. с.

У прыродзе параўнальна рэдка сустракаюцца выпадкі, калі вада ў вялікай колькасці падае непасрэдна са значнай вышыні. Часцей за ўсё прыходзіцца карыстацца такімі рэкамі, рэчышчы якіх маюць невялікі нахіл. У гэтых выпадках для стварэння напору, неабходнага для работы гідраўлічных рухавікоў, прыходзіцца ўзровень вады ўзнімаць штучна пры дапамозе плацін. Калі ўстанавіць плаціну ўпоперак ракі, то ўзровень вады ў рацэ перад плацінай узнімецца.

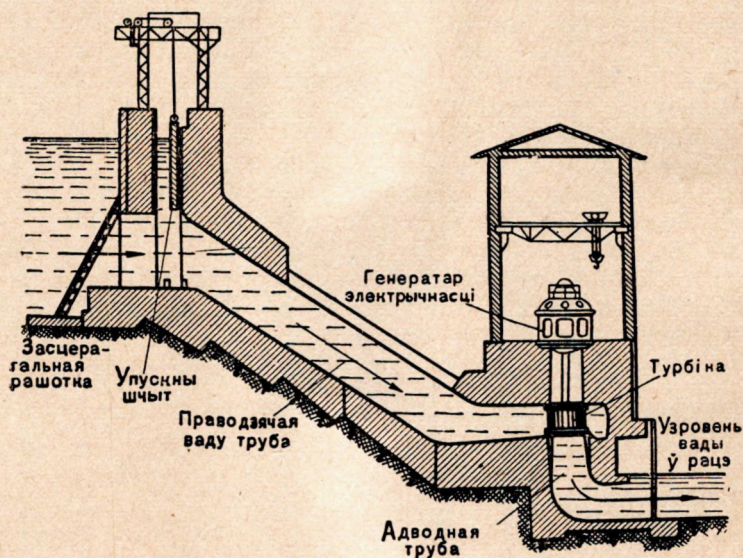


Рис. 112. Схема ўстаноўкі рэактыўнай турбіны на гідраэлектрастанцыі.

На рис. 109 паказана плаціна Дняпроўскай гідраэлектрастанцыі імя У. І. Леніна. Максімальная вышыня напору вады каля 51 м, агульная даўжыня плаціны 760 м.

За кошт энергіі паднятай вады можа быць выканана механічная работа пры дапамозе гідраўлічных рухавікоў, якія выкарыстоўваюць як патэнцыяльную, так і кінетычную энергію вады. Пры гэтым валу рухавіка перадаецца толькі частка энергіі вады.

Адным з прасцейшых і старадаўнейшых рухавікоў з'яўляецца вадзяное кола. На рис. 110 дадзены разрез наліўнога кола, якое скарыстоўвае галоўным чынам патэнцыяльную энергію вады і толькі часткова кінетычную энергію. Каэфіцыент карыснага дзеяння такога кола парадку 40%, а магутнасць нязначная. У цяперашні час вадзяныя колы будуюцца рэдка.

Найбольш дасканалымі гідраўлічнымі рухавікамі з'яўляюцца вадзяныя турбіны. У такіх турбінах вада аддае энергію колу

шляхам змянення велічыні і напрамку скорасці цячэння ў лопасцях турбіны.

Турбіны, якія будуцца і выкарыстоўваюцца ў цяперашні час, падзяляюцца на рэактыўныя і актыўныя.

На рис. 111 паказана схема цячэння вады праз рэактыўную турбіну. Рабочае кола 2 гэтай турбіны знаходзіцца ўнутры накіроўваючага кола 1 з паваротнымі лапаткамі. Паваротам лапатак накіроўваючага кола рэгулюецца расход вады.

З лапатак накіроўваючага кола вада з вялікай скорасцю (v_0) трапляе на лапаткі рабочага кола і, прайшоўшы па іх, выходзіць у адводную трубу са значна меншай скорасцю (v). Маса вады перадае пры гэтым рабочаму колу энергію:

$$\frac{mv_0^2}{2} - \frac{mv^2}{2} = A.$$

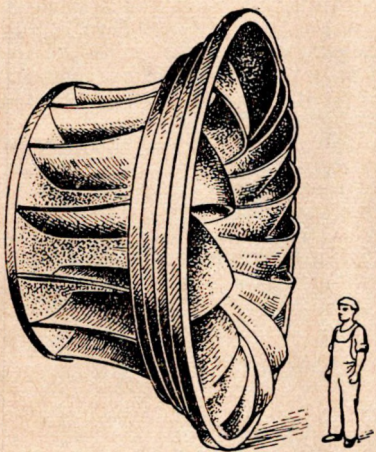


Рис. 113. Выгляд рабочага кола магутнай рэактыўнай турбіны.

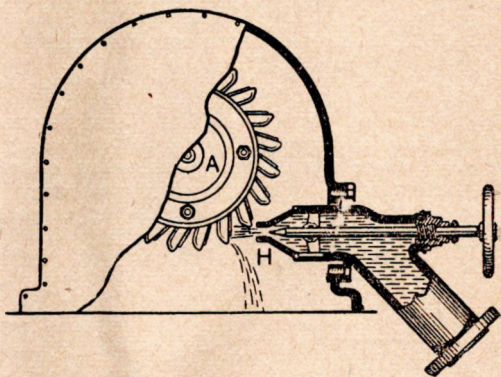


Рис. 114. Схема работы актыўнай турбіны.

На рис. 112 паказана схема ўстаноўкі рэактыўнай турбіны на гідрэлектрастанцыі, а на рис. 113 паказана асобна рабочае кола вялікай рэактыўнай турбіны. Магутнасць турбін, вырабляемых для Куйбышаўскай ГЭС на нашых заводах, будзе парадку 100—120 тыс. *квт*. Дыяметр рабочага кола такой турбіны 9,3 м, а яе агульная вага каля 1600 Т.

Рэактыўныя турбіны прымяняюцца пры самых разнастайных напорах (ад 0,5 да 250 м). Каэфіцыент карыснага дзеяння іх дасягае 94,5%.

На рис. 114 паказана схема работы актыўнай турбіны. Вада з насадкі Н (сапла), унутры якой рухаецца іголка, рэгулюючая паступленне вады, трапляе на рабочае кола А, забяспечанае лапаткамі, якія маюць унутры так званы нож (гэтае кола паказана асобна на рис. 115). Трапіўшы на лапатку ў напрамку, амаль

датычным да вобада кола, струмень вады разразаецца нажом і адхіляецца ў абодва бакі. Пры гэтым вада траціць скорасць, аддаючы колу сваю кінетычную энергію; за кошт гэтай кінетычнай энергіі і адбываецца работа турбіны.

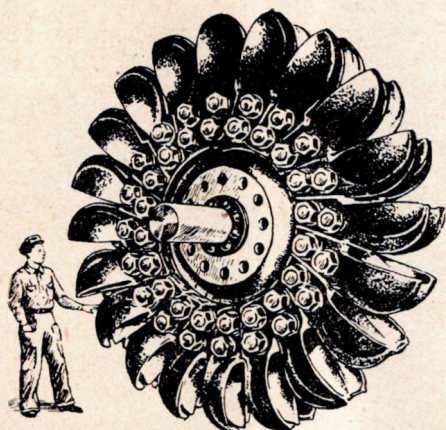


Рис. 115. Выгляд рабочага кола магутнай актыўнай турбіны.

Актыўныя турбіны прымяняюцца пры напорах ад 100 м і вышэй. Іх магутнасць даходзіць да 20 000 кВт, а лік абаротаў да 200 у мінуту.

59. Ветраныя рухавікі. Ветранымі рухавікамі называюцца збудаванні, якія служаць для выкарыстання энергіі рухаючагася паветра — ветру. Энергія ветру часам называецца энергіяй «блэкітнага вугалю».

Гэты від энергіі мае важнае значэнне для сельскай гаспадаркі, дзе ветраныя рухавікі могуць выконваць многія разнастайныя работы: памол зерня, выкачванне вады, размешванне гліны і г. д.

Вецер уяўляе сабой крыніцу таннай энергіі, на жаль, вельмі непастаянную. Таму яшчэ да гэтага часу ён выкарыстоўваецца параўнальна мала. Толькі ў апошнія гады зноў пачалі цікавіцца энергіяй ветру з мэтай выкарыстання яго для патрэб прамысловасці і асабліва сельскай гаспадаркі.

Доследамі знойдзена, што сіла ціску ветру, дзеючая на перпендыкулярна пастаўленую пляцоўку, залежыць ад скорасці ветру, формы і велічыні паверхні пляцоўкі.

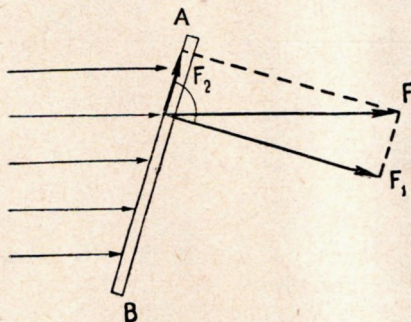


Рис. 116. Сілы, дзеючыя з боку ветру на пласцінку АВ.

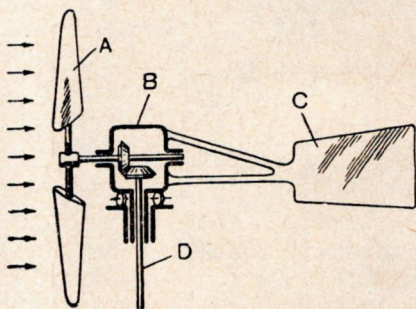


Рис. 117. Схема будовы крыльчатага ветрухавіка.

Няхай вецер дзейнічае на пласцінку АВ пад некаторым вуглом α з сілай F (рис. 116). Пабудуем паралелаграм сіл F , F_1 , F_2 . Сіла F_2 накіравана ўздоўж пласцінкі АВ і ціску на пласцінку не ўтварае. На пласцінку АВ дзейнічае толькі сіла $F_1 = F \cdot \sin \alpha$. Чым бліжэй вугал паміж напрамкам ветру і паверхняй пласцінкі да 90° , тым большы ціск апошняя будзе адчуваць. Калі пласцінка АВ насаджана на вось, то пад дзеяннем складаючай сілы F_1 яна прыйдзе ў вярчэнне.

Схема аднаго з тыпаў ветраных рухавікоў паказана на рис. 117.

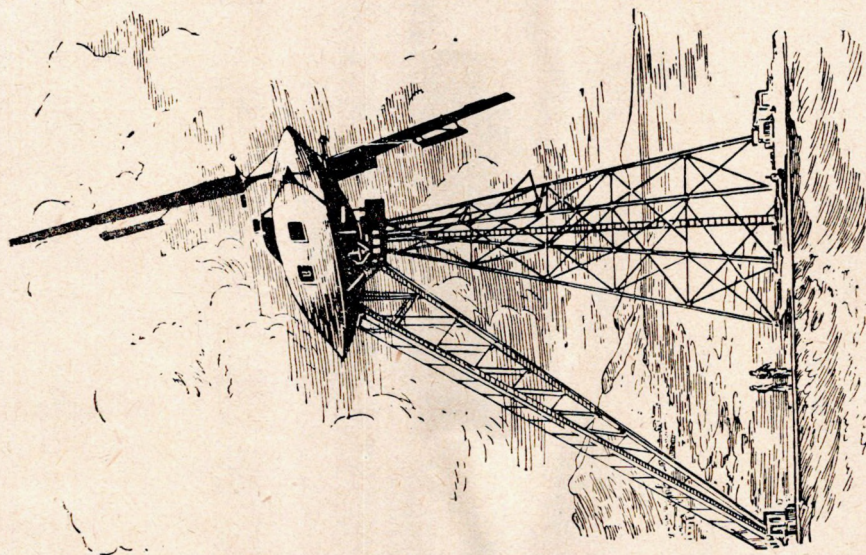
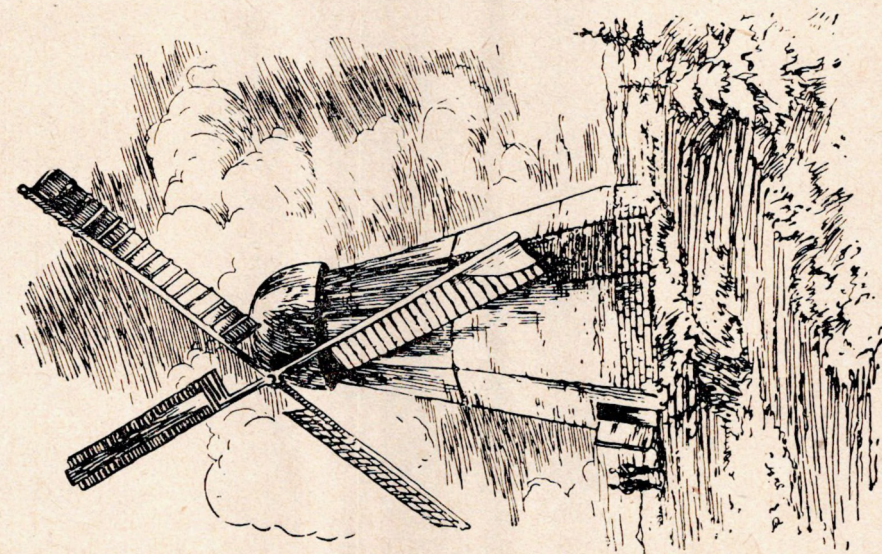


Рис. 118. Ветраны млын (слева) і ветразэлектрычная станцыя магутнасцю ў 100 кэл.

Галоўнымі яго часткамі з'яўляюцца: а) ветравое кола *A*, якое складаецца з некалькіх крыляў; б) галоўка *B* — механізм, які ператварае вярчэнне ветравага кола ў больш хуткае вярчэнне вертыкальнага вала *D*, звязанага з рабочым механізмам; в) прыстасаванне для павароту ветравага кола на вецер, напрыклад хвост *C*.

Сучасныя ветраныя рухавікі забяспечваюцца прыстасаваннямі для аўтаматычнага паварочвання рабочага кола пры змяненні напрамку ветру.

На рыс. 118 паказан стары ветраны млын (злева) і сучасная ветраэлектрычная станцыя магутнасцю 100 *квт*.

МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА І ЦЕПЛЫНЯ.

РАЗДЗЕЛ V.

АСНОВЫ МАЛЕКУЛЯРНА-КІНЕТЫЧНАЙ ТЭОРЫІ
БУДОВЫ РЭЧЫВА.

60. Развіццё малекулярна-кінетычнай тэорыі. *Малекулярна-кінетычнай тэорыяй называецца вучэнне, якое тлумачыць уласцівасці цёл узаемадзеяннем і рухам малекул і атамаў.*

Асноўныя палажэнні, на якіх грунтуецца малекулярна-кінетычная тэорыя рэчыва, выказваліся ўжо ў глыбокай старажытнасці. Яшчэ Дэмакрыт і Леўкіп, славуць мысліцелі старажытнай Грэцыі, каля 2300 год назад вучылі, што ўсе рэчывы пабудаваны з найдрабнейшых частчак — атамаў, і што гэтыя атамы могуць быць розных відаў.

Тыя ж думкі сустракаем мы праз стагоддзе ў Эпікура, а крыху пазней у старажытнарымскага паэта і мысліцеля Лукрэцыя ў яго славутай паэме «Аб прыродзе рэчаў».

Ідэі антычных атамістаў доўгі час былі забыты. Царква праследавала вучоных, якія развівалі ідэі аб атамна-малекулярнай будове рэчыва. Паказальным у гэтых адносінах з'яўляецца наступны гістарычны факт. У 1626 г. парыйскі парламент выдаў дэкрэт, які забараняў пад пагрозай пакарання смерцю распаўсюджванне ідэй аб атамна-малекулярнай будове рэчыва, як матэрыялістычных у сваёй аснове.

Нягледзячы на праследаванні царквы, геніяльныя думкі, хутчэй здагадкі, антычных атамістаў у сярэдзіне XVII ст. зноў атрымалі пашырэнне і далейшае развіццё. У сапраўдную ж навуковую тэорыю гэтыя ідэі ператвараюцца толькі ў XVIII ст.

Адным з заснавальнікаў малекулярна-кінетычнай тэорыі рэчыва з'яўляецца вялікі рускі вучоны М. В. Ламаносаў.

У дзвюх сваіх работах: «Элементы матэматычнай хіміі» і «Аб неадчувальных фізічных частчак» — Ламаносаў выразна выкладае асновы атамна-малекулярнай тэорыі будовы рэчыва, падмацоўваючы іх доследнымі фактамі.

Ламаносаў пісаў: «Металы і некаторыя іншыя цэлы раствараюцца ў растваральніках на вельмі дробныя часткі, якіх нельга бачыць асобна ад растваральніка, але якія складаюць з ім аднароднае цэла. Лятучыя цэлы распыляюцца па паветры і знікаюць у ім. Гаручыя расейваюцца ад дзеяння агню ў неадчувальныя частчакі».

Указаўшы на рад іншых доследных даных, Ламаносаў робіць вывад: «Фізічныя целы падзяляюцца на драбнейшыя часткі, якія ў паасобку пазбягаюць пачуцця зроку, так што целы складаюцца з неадчувальных частчак».

Рухам «неадчувальных частчак» (малекул) і іх узаемадзеяннем Ламаносаў тлумачыў асаблівасці агрэгатных станаў рэчываў, а таксама пераход рэчыва з аднаго агрэгатнага стану ў другі.

У працах Ламаносава ўяўленне аб атамна-малекулярнай будове рэчыва развіваецца ў яснае і канкрэтнае вучэнне, на аснове якога стала магчымым растлумачваць многія фізічныя і хімічныя з'явы.

Навуковыя асновы малекулярна-кінетычнай тэорыі, закладзеныя Ламаносавым, атрымалі далейшае развіццё ў XIX стагоддзі.

У сярэдзіне XIX ст. была падрабязна распрацавана малекулярна-кінетычная тэорыя газаў, і з таго часу яна з'яўляецца кіруючай тэорыяй пры вывучэнні з'яў у газах. Яна прадказала вялікую колькасць новых фактаў і растлумачыла многія з'явы.

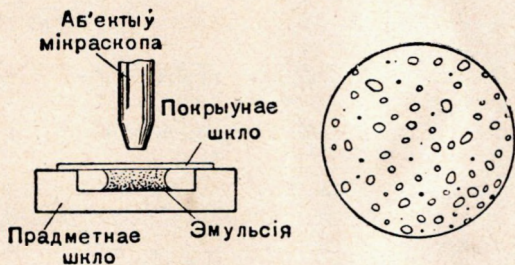


Рис. 119. Схема ўстаноўкі для назірання броунаўскага руху (злева); справа паказаны рухаючыся частчкі, назіраемыя ў мікраскоп.

Мы не бачым малекул. Тым не менш нашы ўяўленні аб малекулах і іх руху пацвярджаюцца шматлікімі доследамі. Разгледзім некаторыя з іх.

61. Броунаўскі рух. Да ліку доследных доказаў руху малекул у цэле належыць з'ява, адкрытая ў 1827 г. англійскім вучоным Броунам.

Калі разглядаць пад мікраскопам эмульсію — дробныя частчкі якога-небудзь рэчыва, што завеслі ў вадкасці і не раствараюцца ў ёй (рис. 119), то можна заўважыць, што гэтыя частчкі знаходзяцца ў бесперапынным руху. Напрамак і велічыня скорасці кожнай такой частчкі хутка мяняюцца. Рух частчак не мае якога-небудзь пераважнага напрамку, ён з'яўляецца зусім бязладным, хаатычным¹. Гэты рух і называецца броунаўскім рухам.

Для назірання броунаўскага руху неабходна прымяшаць да вадкасці любыя дастаткова дробныя цвёрдыя частчкі. Можна, напрыклад, развесці ў вадзе невялікую колькасць чорнай тушы і разглядаць пад мікраскопам найдрабнейшыя яе крупінкі ў кроплі вады.

Броунаўскі рух, назіраемы ў вадкасцях, бывае тым больш ажыўленым, чым меншая вязкасць вадкасці. Мае месца броунаўскі рух і ў газах, прычым там ён асабліва інтэнсіўны.

Назіранні паказваюць, што броунаўскі рух ніколі не спыняецца.

¹ Хаос (грэч. слова) — поўны беспарадак.

Унутры закрытай з усіх бакоў кюветы яго можна назіраць заўсёды: у любы час дня, улётку і ўзімку; яго можна назіраць на працягу многіх дзён, месяцаў, гадоў. Ён цесна звязан з цеплавым станам вадкасці: з павышэннем тэмпературы інтэнсіўнасць броунаўскага руху ўзрастае.

Што ж з'яўляецца прычынай броунаўскага руху?

Адзінай прычынай броунаўскага руху з'яўляецца ніколі не спыняючыся рух малекул таго асяроддзя (вадкасці або газу), у якім знаходзяцца частачкі.

Вадкасць толькі здаецца пад мікраскопам суцэльнай, на самай жа справе яна не з'яўляецца такой, а складаецца з асобных бязладна рухаючыхся малекул, значна больш дробных, чым частачкі ў броунаўскім руху. Малекулы пры сваім руху ўдараюцца аб такія частачкі, зрушваюць іх з месца і такім чынам ускосна выяўляюць сябе. Ясна, што рухаючыся малекулы вадкасці штурхаюць частачку адначасова з усіх бакоў; але паколькі рух малекул зусім бязладны (хаатычны), то частачка, відавочна, можа атрымаць то з аднаго боку большы лік удараў, то з другога, што і прымушае яе рухацца па зігзагападобнай траекторыі (рыс. 120)

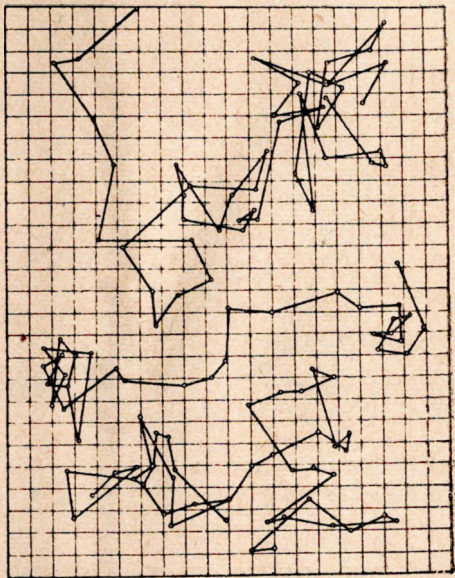


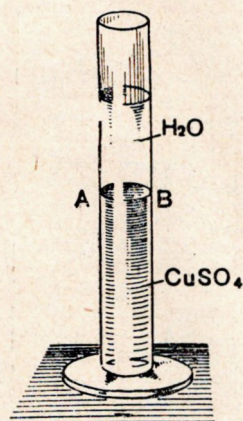
Рис. 120. Траекторыі руху частачак у броунаўскім руху. Светлымі кружочкамі адзначаны месцазнаходжанні частачак праз кожныя 30 секунд.

Цела звычайных, г. зн. дастаткова вялікіх, размераў, змешчанае ў вадкасць (або газ), таксама адчувае штуршкі з боку рухаючыхся малекул вадкасці (або газу). Але лік штуршкоў настолькі вялікі, што параўнальна невялікая розніца ў ліку іх, якая выпадкова можа ўзнікнуць з аднаго боку цела, не зможа прывесці яго ў рух; такое цела ў вадкасці застаецца ў спакоі. Чым меншае цела, тым менш штуршкоў яно адчувае. Для мікраскапічных частачак, назіраемых у броунаўскім руху, лік штуршкоў, якія яны адчуваюць, ужо не так вялікі: таму перавага то аднаго, то другога напрамку здараецца пастаянна, і частачка рухаецца з боку ў бок.

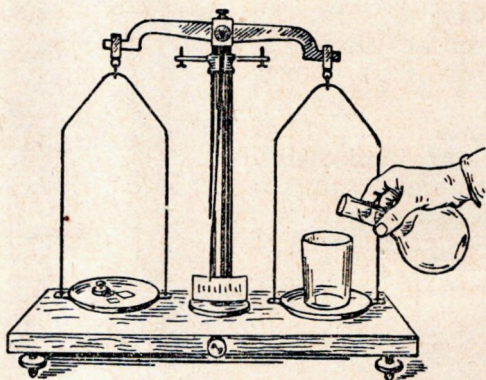
Трэба добра ўразумець сабе, што назіраемая ў броунаўскім руху частачка змяшчае ў сабе мільёны малекул; таму яе бязладны рух не з'яўляецца ўласна малекулярным рухам. Мы не можам

заўважыць штуршкоў асобнай малекулы, а назіраем толькі выпадковае пераважанне штуршкоў малекул у адным якім-небудзь напрамку.

Найбольш падрабязна броунаўскі рух быў вывучан на доследзе французскім вучоным Перэнам. Уяўленне аб хаатычным характары броунаўскага руху дае адзін з рысункаў атрыманых Перэнам (рыс. 120). На гэтым рысунку адзначана становішча адной і той жа частачкі



Рыс. 121. устаноўка для назірання дыфузіі вадкасцей.



Рыс. 122. Дослед па назіранню дыфузіі пары эфіру ў паветры.

ў полі зроку мікраскопа праз кожныя 30 секунд; гэтыя становішчы злучаны прамымі лініямі, хоць у сапраўднасці і за гэтыя прамежкі часу частачка рабіла самыя бязладныя рухі

Вывучэнне броунаўскага руху мела вялікае значэнне ў развіцці навукі аб будове рэчыва, бо яно дало магчымасць вучоным устанавіць важныя заканамернасці малекулярнага руху.

62. Дыфузія Калі ў сасуд, да палавіны запоўнены растворам меднага купаросу, аспярожна наліць чыстай вады паверх раствору, то спачатку атрымліваецца рэзка абазначаная паверхня падзелу *AB* паміж бясколернай вадой і сінім растворам (рыс. 121) Але праз некаторы час можна заўважыць, як вада павольна пачынае сінець, паверхня падзелу робіцца не рэзкай, а праз доўгі час знікае.

У дадзеным доследзе мы сустрэкаемся з новай фізічнай з'явай, якая носіць назву дыфузіі.

Дыфузія — гэта працэс узаемнага пранікнення аднаго ў другое розных рэчываў, прыведзеных у судакрананне.

Лёгка выявіць дыфузію ў газах. Напоўнім ураўнаважаную на вагах шклянку цяжкай парай эфіру. Шаля вагаў з парай эфіру перацягвае (рыс. 122). Праз некаторы час заўважаем, што вагі прыходзяць у стан раўнавагі, а ў пакоі адчуваецца пах эфіру. Значыць,

нягледзячы на тое, што пара эфіру цяжэйшая за паветра яна са шклянкі пранікла ў пакой.

Дыфузія выяўляецца не толькі ў вадкасцях і газах, але і ў цвёрдых целах. У адным з доследаў гладка адшліфаваныя пласцінкі свінцу і золата паклалі адну на другую і паставілі на іх груз. Пры звычайнай пакаёвай тэмпературы (каля 20°C) за 5 гадоў золата і свінца зрасліся, узаемна пранікнуўшы адно ў другое на адлегласць у 1 см. Атрымаўся слой з аднароднага сплаву золата са свінцом, хоць, вядома, ні аб якім плаўленні гэтых металаў пры 20°C не магло б быць і гутаркі.

Вынікі апісаных доследаў лёгка тлумачацца пры дапамозе малекулярна-кінетычнай тэорыі.

Сапраўды, калі целы, што судакранаюцца, складаюцца з асобных малекул, якія бязладна рухаюцца, то натуральна, што гэтыя малекулы могуць пераходзіць праз мяжу судакранання цел, а гэта і ўяўляе сабой з'яву дыфузіі.

З доследаў з дыфузіяй можна зрабіць таксама вывад аб тым, што ў целах паміж малекуламі ёсць свабодная прастора, у якую могуць пранікаць іншыя малекулы.

Калі з'ява дыфузіі мае месца пры судакрананні розных рэчываў, то ў адным і тым жа газе або вадкасці павінна адбывацца тое ж самае. **У выніку дыфузіі шчыльнасць газу ва ўсім аб'ёме выраўноўваецца.**

Працэс дыфузіі паскараецца з павышэннем тэмпературы. Гэта можа быць растлумачана тым, што з павышэннем тэмпературы павялічваецца скорасць бязладнага руху малекул.

З'ява дыфузіі адыгрывае вялікую ролю ў прыродзе: яна спрыяе падтрыманню аднароднасці саставу атмасфернага паветра паблізу паверхні Зямлі. Дыфузія раствораў розных солей у глебе спрыяе нармальнаму жыццеленню раслін.

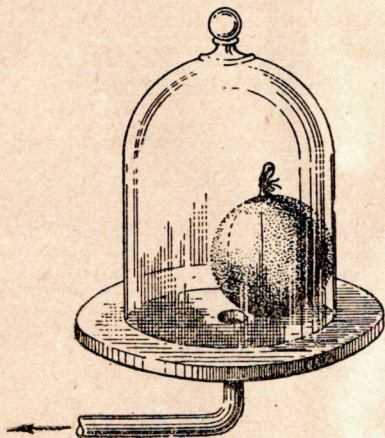
63. Аб зямной атмасферы. Як і ўсе целы, частачкі акружаючага нас паветра прыцягваюцца да Зямлі. Але чаму ж тады яны ўсе не ўпадучь на паверхню Зямлі? Чым растлумачыць наяўнасць ля Зямлі атмасферы?

Толькі бесперапынным рухам малекул можна растлумачыць той факт, што, нягледзячы на сваю вагу, газы, якія змяшчаюцца ў атмасферы, не знаходзяцца на паверхні Зямлі, а размяркоўваюцца са шчыльнасцю, якая ўсё памяншаецца, у досыць тоўстым слаі, дасягаючым некалькіх соцень кіламетраў. Такое размеркаванне газу ў атмасферы адбываецца пад уплывам, з аднаго боку, сілы цяжання, якая прыцягвае малекулы да Зямлі, з другога боку — руху малекул паветра, які раскідвае малекулы па ўсіх напрамках.

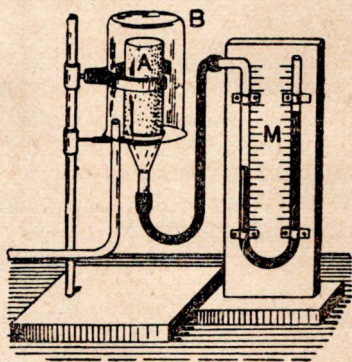
Сляды зямной атмасферы выяўлены па назіраннях палярных ззянняў на адлегласці 1100 — 1300 км ад паверхні Зямлі. Больш 79% масы атмасферы знаходзіцца ў трапасферы — да вышыні 10 — 16 км. Над ёю да вышыні 80 — 90 км распасціраецца стратасфера, якая складае 20% усёй масы атмасферы. Яшчэ вышэй размешчана іёнасфера, якая змяшчае менш 0,5% масы атмасферы.

64. Доследы, якія тлумачацца малекулярна-кінетычнай тэорыяй. Змесцім пад каўпак паветранага насоса закрытую вальебольную камеру, у якой ёсць невялікая колькасць паветра. Мы заўважым, што па меры выкачвання паветра з-пад каўпака камера паступова раздзімаецца, прымаючы форму шара (рыс. 123а). Як растлумачыць вынік гэтага доследу?

Рухаючыся малекулы паветра няспынна бамбардзіруюць сценкі камеры звонку і знутры. Пры адкачванні паветра з-пад каўпака хутка памяншаецца лік малекул, бамбардзіруючых камеру звонку. Але ўнутры закрытай камеры лік малекул не змяняецца; іх ўздзеянне на



Рыс. 123а. Пры выкачванні паветра з-пад каўпака гумавая камера паступова раздзімаецца, прымаючы форму шара.



Рыс. 123б. Устаноўка для назірання дыфузіі свяцільнага газу або вадароду ў паветры.

сценку камеры ўсё больш і больш перавышае ўздзеянне знадворных малекул; у выніку камера раздзімаецца.

Дослед паказвае, што малекулы адрозніваюцца па сваіх размерах і масе.

Пры адной і той жа тэмпературы і пры адным і тым жа ціску малекулы з меншай масай рухаюцца хутчэй, чым малекулы больш масіўныя. Гэты вывад можна пацвердзіць на наступным доследзе.

Да порыстага сасуда *A* прымазана лейка, злучаная з манометрам *M*. Калі гэты сасуд змясціць пад шклянку *B* і напоўніць апошні свяцільным газам (або вадародам), то ціск унутры сасуда павышаецца (рыс. 123б). Гэта адбываецца ў выніку таго, што свяцільны газ, малекулы якога маюць меншую масу і ўладаюць большай рухомасцю, чым малекулы кіслароду і азоту, пранікае праз поры сасуда хутчэй, чым з яго выходзіць паветра. Калі праз некаторы час зняць з порыстага сасуда шклянку *B* са свяцільным газам, то ціск унутры сасуда пачынае спадаць і становіцца меншым за атмасферны ціск. Цяпер свяцільны

газ хутчэй выходзіць з порыстага сасуда, чым паветра звонку ўваходзіць у яго.

65. Лік малекул у адзінцы аб'ёму рэчыва. Размеры малекул. У свеце малекул, або, як прынята гаварыць, у мікрасвеце, мы сустракаемся з вельмі вялікімі колькасцямі вельмі малых частачак. Рознымі спосабамі (яны вывучаюцца ў вышэйшай школе) знойдзена, што **ў 1 см³ любога газу пры нармальных умовах (0° С і 760 мм рт. сл.) знаходзіцца каля 2,7 · 10¹⁹ малекул.**

Каб уявіць сабе, наколькі вялікі гэты лік, разгледзім наступныя прыклады.

Уявім сабе ампулку ёмкасцю ў 1 см³. Дапусцім, што ампулка пустая. Якім-небудзь чынам зробім у ампулцы найтанчэйшую адтуліну, такую, каб праз яе ў 1 сек магло пранікаць унутр ампулкі па 100 млн. малекул паветра. Паўстае пытанне, колькі часу спатрэбіцца, каб такім шляхам напоўніць ампулку да нармальнай шчыльнасці?

Падлік паказвае, што для гэтага патрэбна будзе каля 9000 гадоў.

Другі прыклад. Калі ўзяць колькасць цаглін, роўную колькасці малекул у 1 см³ газу пры нармальных умовах, то, будучы шчыльна ўложанымі, гэтыя цагліны пакрылі б паверхню ўсёй сушы зямнога шара слоём вышынёю ў 120 м, г. зн. вышынёй, перавышаючай амаль у 4 разы вышыню 10-павярховага дома.

Велзарная колькасць малекул, якія змяшчаюцца ў 1 см³ газу, указвае на вельмі малыя размеры саміх малекул. Нават у самы моцны мікраскоп мы не можам убачыць малекулу простага рэчыва¹. Аднак існуюць разнастайныя спосабы, якія дазваляюць вызначыць парадак велічыні аб'ёму малекулы. Адзін з такіх спосабаў заключаецца ў наступным. Калі выліць на паверхню вады ў якім-небудзь сасудзе малюсенькую кроплю масла, яна расцягнецца, утвараючы на вадзе найтанчэйшую плёнку. Якой бы тонкай ні была гэтая плёнка, яна складаецца не менш чым з аднаго слоя малекул. Вызначыць таўшчыню гэтай плёнкі няцяжка. Дапусцім, што мы вылілі кропельку масла аб'ёмам 0,001 см³ на паверхню вады; пры гэтым аказалася, што, расцякаючыся, кропелька масла ўтварыла тонкую плёнку плошчай у 0,5 м², г. зн. 5 000 см². Ведаючы аб'ём плёнкі (роўны аб'ёму кроплі) і велічыню яе паверхні, знойдзем таўшчыню плёнкі:

$$d = \frac{0,001 \text{ см}^3}{5\,000 \text{ см}^2} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ см}.$$

Папярочнік адной малекулы на самай справе яшчэ меншы. Дакладныя вымярэнні і разлікі паказваюць, што дыяметры малекул (калі прымаць іх за шары) — парадку двух-трох стомільённых долей сантыметра (каля 10⁻⁸ см).

Каб мець уяўленне аб парадку велічыні масы малекулы, разлічым масу малекулы вадароду.

¹ Сучасныя электронныя мікраскопы дазваляюць адрозніць абрысы некаторых складаных малекул, якія складаюцца з соцень атамаў.

Маса ўсіх малекул вадароду ў 1 см^3 пры 0°C і ціску ў адну атмасферу роўна $0,00009 \text{ г}$; падзяліўшы гэтую масу на агульны лік малекул, якія змяшчаюцца ў 1 см^3 , знойдзем масу адной малекулы:

$$m_{\text{H}_2} = \frac{0,00009 \text{ г}}{2,7 \cdot 10^{19}} \approx 3,3 \cdot 10^{-24} \text{ г}.$$

66. Скорасць руху малекул. Скорасць руху газавых малекул можна вымераць па доследзе.

Адзін з такіх доследаў заключаецца ў наступным. У моцна адкачаным сасудзе знаходзіцца плацінавы пасярэбраны дроцік PP (rys. 124, а), які акружан двума цыліндрамі A і B так, што з'яўляецца іх агульнай воссю, вакол якой цыліндры могуць вярцецца.

Ва ўнутраным цыліндры A паралельна дроціку прарэзана вузкая шчыліна S . Плацінавы дроцік напальваюць электрычным токам да тэмпературы, пры якой серабро пачынае плавіцца і выпарацца. Пры гэтым некаторыя малекулы серабра пралятаюць праз шчыліну і адкладваюцца на знадворным цыліндры ў выглядзе сярэбранай палоскі L (rys. 124, б), якая ўяўляе сабой выразнае ізабражэнне шчыліны.

Затым абодва цыліндры прыводзяцца ў вярчэнне ў напрамку, паказаным стрэлкай. Пасля спынення цыліндраў аказваецца, што сярэбраная палоска L , якая адклалася на знадворным цыліндры B у час яго руху, зрушылася ў бок, працілеглы вярчэнню прыбора у становішча L_1 .

Гэтае зрушэнне тлумачыцца тым, што, пакуль малекулы серабра працягалі адлегласць ад шчыліны S да знадворнага цыліндра, адбылося зрушэнне цыліндра на адлегласць LL_1 (rys. 124 б).

Чым большая скорасць вярчэння цыліндраў, тым большае атрымліваецца зрушэнне. Ведаючы адлегласць на якую зрушваецца палоска серабра, і скорасць вярчэння цыліндраў, можна вызначыць скорасць руху малекул.

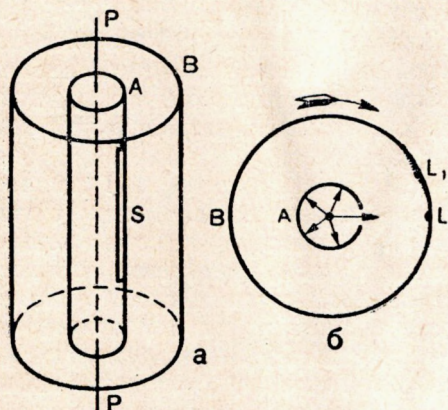
Сярэбраная палоска L , якая атрымліваецца ў час вярчэння цыліндраў, па краях рымзта. Найбольш шчыльнай аказваецца сярэдняя частка яе, па абодва ж бакі шчыльнасць яе крыху памяншаецца.

Гэты факт паказвае на тое, што пры адной і той жа тэмпературы розныя малекулы аднаго і таго ж рэчыва маюць розныя скорасці, хоць большасць малекул, якія адклаліся ў сярэдняй частцы палоскі маюць скорасці, блізкія па велічыні адна да другой.

З доследу знойдзена, што пры тэмпературы 1200° (напал ніці) скорасць большасці малекул серабра знаходзіцца ў межах ад $500 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ да $625 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$.

Немагчыма прадказаць, якую скорасць і які напрамак будзе мець тая ці іншая малекула. Але цікава тое, што ў велізарнай масе малекул газу, якія хаатычна рухаюцца, існуе пэўнае размеркаванне малекул па скорасцях. Аказваецца, што найбольшы лік малекул, змешчаных у дадзеным аб'ёме газу, рухаецца са скорасцямі, блізкімі да некаторай скорасці, якую называюць найвергагоднейшай скорасцю пры дадзенай тэмпературы газу.

Ніжэй у табліцы прыведзена размеркаванне малекул азоту па скорасцях пры пакаёвай тэмпературы.



Рys. 124. Схема ўстаноўкі для вызначэння скорасці руху малекул.

Межы скорасцей (у $\frac{м}{сек}$)	Працэнт агульнага ліку малекул, маючых скорасці, якія знаходзяцца ва указаных межах
Менш 100	1
Ад 100 да 300	25
» 300 » 500	42
» 500 » 700	24
» 700 » 900	7
Звыш 900	1

З табліцы відаць, што найбольшы лік малекул маюць скорасці ў межах ад 300 да 500 $\frac{м}{сек}$; паміж 100 і 700 $\frac{м}{сек}$ заключаны скорасці 91% ліку ўсіх малекул, і толькі 9% маюць скорасці большыя за 700 $\frac{м}{сек}$ і меншыя за 100 $\frac{м}{сек}$.

Такім чынам, і ў вельмі вялікай колькасці выпадковых з'яў можа існаваць пэўная заканамернасць.

Сярэднія скорасці малекул некаторых газаў пры 0°C і 760 мм рт. сл.

Вадарод	1692 $\frac{м}{сек}$.	Азот	454 $\frac{м}{сек}$.
Кісларод	425 $\frac{м}{сек}$.	Вадзяная пара	566 $\frac{м}{сек}$.

Пры павышэнні тэмпературы скорасці малекул узрастаюць. Але і пры 0° скорасці гэтых велізарных, яны параўнальны толькі са скорасцямі артылерыйскіх снарадаў.

67. Лік сутыкненняў і сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул. Сярэдняя скорасць руху малекул, як мы бачылі, пры звычайных умовах надзвычай вялікая. Між тым назіранні за дыфузіяй паказваюць, што гэтая з'ява нават у газах, частачкі якіх найбольш рухомыя, працякае параўнальна павольна.

Вядома, напрыклад, што калі выліць дзе-небудзь у пакоі духі, то пах ад іх, які выклікаецца выпарэннем і дыфузіяй духоў у паветра, не вельмі хутка распаўсюджваецца па ўсім пакоі.

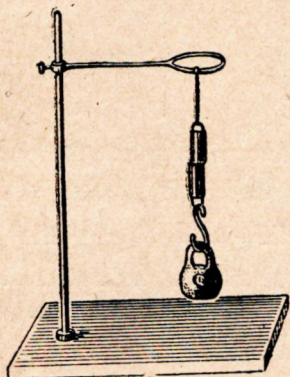
Ці не абвяргае павольны працэс дыфузіі тое, што было сказана аб вялікіх скорасцях малекул? Не, не абвяргае. Справа ў тым, што кожная малекула газу пры руху сустракае на сваім шляху велізарную колькасць сутыкненняў з іншымі малекуламі. Падлічана, што ў сярэднім кожная малекула азоту, напрыклад, пры 0°C і ціску ў 1 атмасферу ў 1 сек сутыкаецца з іншымі малекуламі каля 7,5 мільярда разоў. Таму яе «свабодны прабег», г. зн. сярэдняя даўжыня шляху, праходзімага ад аднаго сутыкнення да другога, вельмі малы.

Мы знойдзем яго, калі падзелім сярэднюю скорасць малекулы на сярэднюю колькасць яе сутыкненняў. Так, напрыклад, сярэдняя даўжыня λ свабоднага прабегу малекулы азоту будзе роўна:

$$\lambda = \frac{454 \cdot 100 \frac{см}{сек}}{7,5 \cdot 10^9 \frac{1}{сек}} \approx 0,000006 \text{ см.}$$

Такім чынам, малекула газу, які знаходзіцца ў звычайных умовах, больш «топчацца на месцы», чым рухаецца ўперад.

68. Сілы ўзаемадзеяння паміж малекуламі. Усякае цела складаецца з асобных атамаў або малекул. Але чаму ўсё ж цяжка аддзяліць, напрыклад, адну частку цвёрдага цела ад другой? Справа ў тым, што паміж асобнымі малекуламі дзейнічаюць сілы ўзаемнага прыцяжэння. Гэтыя сілы прыцяжэння (счаплення) аказваюць супраціўленне ўсякай спробе аддзяліць адну частку цела ад другой. Сілы прыцяжэння паміж малекуламі дзейнічаюць толькі на вельмі малых адлегласцях. Асколкі шкла нельга зрасціць, прыкладаючы іх адзін да другога, паколькі з прычыны няроўнасцей не ўдаецца іх зблізіць на тую адлегласць, на якой пачынаюць праяўляцца сілы малекулярнага прыцяжэння. Але калі размякчыць шкло нагрываннем, то размякчоныя часткі можна цесна зблізіць, і шкло ў гэтым выпадку спайваецца.



Рыс. 125. Дослед, які паказвае наяўнасць сіл счаплення паміж малекуламі цвёрдага цела.



Рыс. 126. Пры судакрананні плітак Іягансана праяўляецца дзеянне сіл малекулярнага прыцяжэння.

Два кавалкі свінцу, вельмі сціснутыя адзін з другім, злучаюцца ў адзін кавалак так моцна, што можна на такі кавалак падвесіць груз у некалькі кілаграмаў (рыс. 125). Са свінцовых апілак можна лёгка спрасаваць цэлы кавалак свінцу.

На вытворчасці для вымярэнняў ужываюцца гладкія, адпаліраваныя стальныя пласцінкі (так званыя пліткі Іягансана). Пры судакрананні плітак Іягансана прыкметна праяўляецца дзеянне сіл малекулярнага прыцяжэння (рыс. 126).

Злучэнне двух кавалкаў металу пры дапамозе зваркі або спайкі іх тлумачыцца дзеяннем сіл малекулярнага прыцяжэння.

У цвёрдых целах малекулы збліжаны паміж сабой, таму сілы прыцяжэння паміж імі вельмі вялікія. Гэтым тлумачыцца, што цвёрдае цела захоўвае сваю форму і аб'ём. А каб змяніць іх, трэба прыкладзіць значную сілу.

Але і ў цвёрдых целах частачкі не з'яўляюцца нерухомымі: яны бязладна вагаюцца каля некаторых сярэдніх становішчаў.

У існаванні сіл счаплення паміж малекуламі вадкасці лёгка пераkanaцца на наступным доследзе.

Да спружынкі (рыс. 127) падвешваюць на нітцы шкляную пласцінку так, каб яе ніжняя паверхня была размешчана гарызантальна. Калі гэтую пласцінку паднесці да сасуда з вадой так, каб вада смочвала пласцінку, то апошняя прыліпне да вады. Пры адрыванні

пласцінкі ад вады спружына прыкметна расцягваецца, што даказвае існаванне сіл сцяплення. Па велічыні расцяжэння спружыны можна вызначыць сілу, патрэбную для адрывання пласцінкі. Адарваўшы пласцінку, можна ўбачыць, што яе ніжняя паверхня аказваецца мокрай; значыць, пры адрыванні пласцінкі мы пераадольваем сілы сцяплення паміж частачкамі вады.

Наяўнасцю сілы ўзаемадзеяння паміж частачкамі вадкасці тлумачыцца той факт, што дзве кроплі вадкасці пры судакрананні зліваюцца ў адну кроплю.

У вадкасцях сілы прыцяжэння паміж малекуламі з прычыны вялікай блізкасці іх вельмі значныя, але сувязь паміж малекуламі дазваляе яшчэ асобным малекулам «слізгаецца» адна адносна другой. Таму вадкасць лёгка мяняе сваю форму пры яе пераліванні з аднаго сасуда ў другі. Гэтая ўласцівасць вадкасцей называецца цякучасцю.

Цвёрдае цела цяжка расцягнуць, але таксама цяжка яго і сціснуць. Цяжка сціснуць і вадкасць.

Значыць, **малекулярныя сілы прыцяжэння не толькі ў прыцяжэнні, але і ў адштурхоўванні, чым тлумачыцца супраціўленне цел як расцяжэнню, так і сцісканню.**

На першы погляд цяжка зразумець, якім чынам сілы малекулярнага ўзаемадзеяння могуць быць і сіламі прыцяжэння, і сіламі адштурхоўвання. Успомнім, аднак, што ўзаемадзеянне электрычных зарадаў таксама бывае і прыцяжэннем, і адштурхоўваннем, а ў атамах ёсць і дадатна, і адмоўна зараджаныя частачкі. Аднайменна зараджаныя частачкі адштурхоўваюцца, а рознайменна зараджаныя прыцягваюцца.

Сувязь паміж частачкамі ў цвёрдых целах падобна да сувязі паміж шарыкамі пры дапамозе спружынак (рис. 128). Спружынкі супраціў-

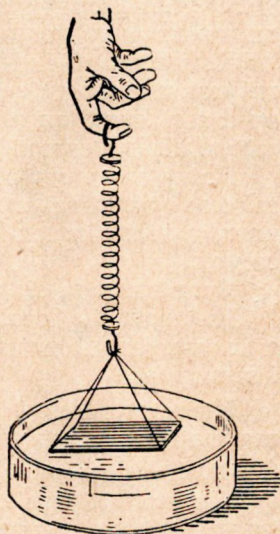


Рис. 127. Пры адрыванні шкляной пласцінкі ад вады спружына расцягваецца; такім шляхам выяўляецца існаванне сіл сцяплення паміж шклом і вадой.



Рис. 128. Мадэль, якая ілюструе характар сувязі паміж частачкамі ў цвёрдых целах.

ляюцца як расцяжэнню, так і сцісканню. Вядома, у сапраўднасці ніякіх спружынак няма, будова і ўзаемадзеянне малекул значна больш складаныя, але простая мадэль сувязі дае магчымасць прыблізна правільна растлумачыць вынікі доследаў.

Мы разгледзелі праяўленне сіл малекулярнага прыцяжэння і адштурхоўвання ў цвёрдых і вадкіх целах. Звернемся цяпер да газаў.

Шчыльнасць газаў значна меншая за шчыльнасць цвёрдых і вадкіх цел. Так, напрыклад, шчыльнасць вадзяной пары пры 100° і ціску ў 1 ат меншая за шчыльнасць вады пры тых жа ўмовах у 1670 разоў. Таму ў газах частачкі знаходзяцца на параўнальна больш далёкіх адна ад другой адлегласцях, чым у целах цвёрдых і вадкіх.

Значыць, наяўнасць сіл малекулярнага прыцяжэння і адштурхоўвання мала ўплывае на ўласцівасці газаў. Гэта істотным чынам адбываецца на руху малекул газу.

Калі асобная малекула газу ў дадзены момант рухаецца ў якім-небудзь напрамку, то яна будзе працягваць гэты рух у тым жа напрамку з пастаянным скорасцю да таго часу, пакуль не ўдарыцца ў сценку сасуда або не сутыкнецца з другой малекулай.

Паступальным рухам малекул газу тлумачыцца ўласцівасць газу займаць усю аддадзеную яму прастору. Газ не можа займаць, напрыклад, толькі ніжнюю палавіну сасуда, а распаўсюджваецца па ўсёму сасуду.

Якая прырода сіл малекулярнага ўзаемадзеяння?

Мы ведаем, што малекулы складаюцца з атамаў, у састаў якіх уваходзяць дадатна і адмоўна зараджаныя частачкі — пратоны і электроны.

Узаемадзеяннем і рухам гэтых зараджаных частчак і абумоўліваюцца малекулярныя сілы.

69. Цеплавы рух. Тэмпература. Знаёмячыся з броунаўскім рухам (§ 61), мы адначалі, што скорасць руху частчак у гэтым руху звязана з тэмпературай. Пры павышэнні тэмпературы скорасць руху частчак павялічваецца, пры паніжэнні тэмпературы — паніжаецца. Але броунаўскі рух ёсць вынік хаатычнага руху малекул вадкасці або газу. Значыць, **тэмпература цела залежыць ад скорасці руху малекул.**

Цёплая на вобмацак вада складаецца з такіх жа малекул, як і халодная. Розніца паміж імі заключаецца ў скорасці руху малекул. Скорасць руху малекул вызначае сабой цеплавы стан цела, таму **хаатычны рух малекул у газах, вадкасцях і цвёрдых целах называюць цеплавым рухам.**

У цеплавым руху ўдзельнічаюць усе малекулы цела, таму са змяненнем цеплавога руху змяняецца ва ўсіх адносінах і само цела. Сапраўды, у залежнасці ад змянення тэмпературы мяняюцца фізічныя ўласцівасці рэчыва: аб'ём, цвёрдасць, пругкасць, электрычныя, магнітныя і аптычныя ўласцівасці. Змяняецца хімічная роднасць; злучэнні, якія самі сабой узнікаюць пры адных тэмпературах, распадаюцца пры другіх і г. д.

З малекулярна-кінетычнай тэорыі вынікае, што тэмпература цела знаходзіцца ў цеснай сувязі з сярэдняй кінетычнай энергіяй малекул. **Чым большая сярэдняя кінетычная энергія малекул цела, тым вышэйшая яго тэмпература.** Памяншэнне сярэд-

няй кінетычнай энергіі малекул адпавядае паніжэнню тэмпературы цела.

Калі сярэдняя кінетычная энергія малекул аднаго газу роўна сярэдняй кінетычнай энергіі малекул другога газу, то тэмпературы гэтых газаў аднолькавыя. З другога боку, калі мы маем сумесь, якая складаецца з некалькіх газаў, напрыклад паветра, то пры ўстанавіўшайся тэмпературы сярэдняя кінетычная энергія малекул усіх газаў, уваходзячых у сумесь, аднолькавая.

Можна лічыць таксама, што пры адной і той жа тэмпературы сярэдняя кінетычная энергія малекул рэчыва адна і тая ж, у якім бы стане рэчыва ні знаходзілася. Так, сярэдняя кінетычная энергія малекул лёду пры 0°C роўна сярэдняй кінетычнай энергіі малекул вады пры 0°C ; сярэдняя кінетычная энергія малекул вады пры 100°C роўна сярэдняй кінетычнай энергіі малекул пары пры такой жа тэмпературы і г. д.

Такім чынам, асноўныя вывады малекулярна-кінетычнай тэорыі зводзяцца да наступнага:

Усе целы прыроды складаюцца з каласальнай колькасці атамаў і малекул, якія знаходзяцца ў стане бесперапыннага хаатычнага руху.

Паміж атамамі і малекуламі дзейнічаюць сілы прыцяжэння і адштурхоўвання.

Сярэдняя велічыня кінетычнай энергіі хаатычна рухаючыхся атамаў або малекул вызначае тэмпературу цела. Павышэнне тэмпературы абазначае павелічэнне сярэдняй скорасці хаатычнага руху частачак, паніжэнне тэмпературы, наадварот,—памяншэнне сярэдняй скорасці гэтага руху.

РАЗДЗЕЛ VI.

ЦЕПЛЫНЯ І РАБОТА.

70. Энергія руху і ўзаемадзеяння малекул. Унутраная энергія цел. Мы цяпер ведаем, што малекулы, з якіх складаюцца целы, знаходзяцца ў руху. Малекулы газу рухаюцца паступальна з рознымі скорасцямі і ў розных напрамках. Для газу характэрна *хаатычнасць руху малекул*. У вадкасцях малекулы могуць вагацца, вярцецца і паступальна перамяшчацца адна адносна другой. У цвёрдых целах малекулы і атамы вагаюцца каля некаторых сярэдніх становішчаў.

Як і ўсякія целы, што рухаюцца, малекулы ўладаюць кінетычнай энергіяй.

Мы ведаем таксама, што малекулы ў цэле звязаны паміж сабой сіламі сцяплення: у газах слаба, у вадкасцях і цвёрдых целах вельмі моцна. Таму малекулы ўладаюць таксама патэнцыяльнай энергіяй, якая залежыць ад іх узаемага размяшчэння.

Кінетычная энергія руху частачак, з якіх складаецца цела, разам з патэнцыяльнай энергіяй узаемадзеяння гэтых частачак складаюць унутраную энергію цела.

Маючы заўсёды які-небудзь запас унутранай энергіі, цела адна-часова можа ўладаць механічнай энергіяй. Напрыклад, снарад, які рухаецца на некаторай вышыні, акрамя ўнутранай энергіі, уладае яшчэ механічнай энергіяй — патэнцыяльнай і кінетычнай.

71. Змяненне ўнутранай энергіі цела. Унутраная энергія цела не з'яўляецца нейкай пастаяннай велічынёй: у аднаго і таго ж цела яна можа змяняцца. Пры павышэнні тэмпературы, напрыклад, унутраная энергія цела павялічваецца, паколькі павялічваецца сярэдняя кінетычная энергія руху малекул гэтага цела. З паніжэннем жа тэмпературы, наадварот, унутраная энергія цела памяншаецца.

Унутраная энергія мяняецца таксама пры пераходзе цела з аднаго аграгатнага стану ў другі, пры дэфармацыі цела, пры раздробленні цела на больш дробныя часткі, паколькі ва ўсіх гэтых выпадках мяняецца ўзаемнае размяшчэнне частачак, а значыць, і іх патэнцыяльная энергія.

З усяго сказанага вынікае, што *ўнутраная энергія цела залежыць ад стану гэтага цела. Са змяненнем стану цела мяняецца і яго ўнутраная энергія.*

Разгледзім цяпер, у выніку якіх працэсаў адбываецца змяненне ўнутранай энергіі цела.

Калі цела, якое рухаецца, выконвае работу супраць сіл трэння, то яго механічная энергія памяншаецца; адначасова мяняецца і стан цела. Пры трэнні целы награвваюцца, дробяцца на часткі і нават могуць пераходзіць з аднаго адрэгатаўнага стану ў другі (напрыклад, пры трэнні плаваюцца кавалачкі лёду). Значыць, *у працэсе выконвання работы ўнутраная энергія цела змяняецца.*

Унутраную энергію цела можна змяняць і іншым шляхам. Вада ў чайніку, пастаўленым на пліту, закіпае, яе ўнутраная энергія змяняецца. Паветра і розныя прадметы ў пакоі награвваюцца ад печы; значыць, іх унутраная энергія павялічваецца, паколькі павялічваецца кінетычная энергія малекул.

Але пры гэтым работа не выконваецца. Значыць, змяненне ўнутранай энергіі можа адбывацца не толькі ў выніку выконвання работы, але і пры розных цеплавых працэсах.

Працэс змянення ўнутранай энергіі цела без выконвання работы называецца цеплаперадачай. Цеплаперадача ажыццяўляецца і пры непасрэдным кантакце цел (чайнік на пліце) і калі целы падзелены адлегласцю (награванне прадметаў ад печы або ад сонца).

Такім чынам, унутраную энергію цела можна змяняць двума шляхамі: шляхам выконвання работы і шляхам цеплаперадачы.

Калі цела павялічвае запас сваёй унутранай энергіі, то гэта значыць, што яно атрымлівае нейкую колькасць энергіі звонку; наадварот, памяншэнне запasu ўнутранай энергіі абазначае, што цела аддае частку сваёй энергіі.

Мерай энергіі, атрымліваемай або аддаваемай целам у працэсе цеплаперадачы, з'яўляецца асобая велічыня, якая называецца колькасцю цеплыні.

72. Адзінка колькасці цеплыні. У тыя часы, калі ўпершыню пачалі рабіць вымярэнні колькасці цеплыні (другая палавіна XVIII ст.), паянцямі работы і энергіі ў навуцы яшчэ не карысталіся (яны былі ўведзены ў XIX ст.).

Для вымярэння колькасці цеплыні была ўведзена асобая адзінка. *За адзінку колькасці цеплыні прынята тая колькасць цеплыні, якая неабходна для награвання 1 г вады на 1°С. Гэтая адзінка называецца калорыяй¹* (скарочанае абазначэнне: кал). Ужываюць таксама і адзінку, у 1000 разоў большую, — кілокалорыю (ккал).

¹ Калорыя — ад лацінскага слова калор — жар.



Рыхман Георг (1711 — 1753) — наш выдатны вучоны. Нарадзіўся ў 1711 г., у адзін год з Ламаносавым Вучыўся ў Пецябургскай Акадэміі навук. У 1741 г. быў прызначан прафесарам акадэміі. Яго работы закраналі галоўным чынам даследаванні цеплыні і электрычнасці. У галіне цеплыні ён заклаў асновы каларыметрыі. Разам з Ламаносавым упершыню ў Расіі пачаў вывучэнне электрычных з'яў.

Дакладныя вымярэнні паказваюць, што для награвання 1 г вады на 1°C патрэбна крыху большая або меншая колькасць цеплыні, у залежнасці ад зыходнай тэмпературы.

Так, для награвання 1 г вады ад 1 да 2° патрэбна прыблізна на 1% больш колькасці цеплыні, чым для награвання ад 31 да 32° . Пры

дакладных вымярэннях прынята лічыць за 1 калорыю колькасць цеплыні, неабходную для награвання 1 г чыстай вады ад $19,5$ да $20^{\circ},5\text{C}$.

Практыкаванне 17.

У першай палавіне XVIII ст. яшчэ не існавала адрознення паміж вымярэннем тэмпературы і вымярэннем колькасці цеплыні. Вядлікае значэнне ў размежаванні і ўдакладненні гэтых паняццяў мелі работы пецябургскага акадэміка Рыхмана.

Рашыце задачу, прапанаваную Рыхманам:

1. Змяшалі m_1 грамаў вады пры тэмпературы t_1 з m_2 грамамі вады пры тэмпературы t_2 . Вызначыць тэмпературу сумесі.

2. Якая атрымаецца тэмпература сумесі, калі змяшаць 600 г вады пры 80°C з 200 г вады пры 20°C ?

3. Літр вады пры 90°C улілі ў ваду пры 10°C , прычым тэмпература вады стала 60°C . Колькі было халоднай вады?

4. Вызначыць, колькі трэба наліць у сасуд гарачай вады, нагрэтай да 60°C , калі ў сасудзе ўжо знаходзіцца 20 л халоднай вады пры тэмпературы 15°C ; тэмпература сумесі павінна быць 40°C .

5. Прыбор для вымярэння колькасці падаючай на Зямлю сонечнай энергіі складаецца з невысокага цыліндра, плошча асновы якога 3 дм^2 . Цыліндр змяшчае 1200 г вады, тэмпература якой павышаецца на $0,5^{\circ}\text{C}$ у 1 мінуту. Калі на пакрытую сажай аснову цыліндра падаюць перпендыкулярна сонечныя праменні. Вызначыць, колькі калорый атрымлівае ў 1 мінуту кожны квадратны сантыметр паверхні Зямлі, перпендыкулярнай к напрамку сонечных прамянёў.

73. Паняцце аб цеплаёмкасці цела. Удзельная цеплаёмкасць рэчыва. Награваючы целы з аднолькавай масай, але якія складаюцца з розных рэчываў (жалеза, дрэва, цэглы і г. д.), можна выявіць, што для павышэння іх тэмпературы на дадзены лік градусаў спатрэбіцца розныя колькасці цеплыні.

Колькасць цеплыні, якую трэба перадаць целу, каб павысіць яе тэмпературу на 1° , называецца цеплаёмкасцю гэтага цела.

Дослед паказвае, што для награвання цела не на 1°C , а на t° , патрэбна ў t разоў большая колькасць цеплыні. Пры астыванні на t° цела аддае такую ж колькасць цеплыні, якую паглынае пры награванні на t° .

Чым большая маса цела, тым большая яго цеплаёмкасць, г. зн. тым большая колькасць цеплыні патрэбна для награвання яго на 1°C .

Цеплаёмкасць аднароднага цела прапарцыянальна яго масе і залежыць ад рэчыва, з якога яно складаецца.

Параўноўваць паміж сабой можна цеплаёмкасці розных рэчываў, якія маюць аднолькавую масу, роўную, напрыклад, адзінцы масы.

Колькасць цеплыні, неабходная для награвання 1 г рэчыва на 1°C называецца ўдзельнай цеплаёмкасцю рэчыва.

Няхай Q — колькасць цеплыні, якую трэба перадаць целу, маса якога m , каб павысіць тэмпературу яго ад t_1° да t_2° . Каб вызначыць удзельную цеплаёмкасць рэчыва c , трэба колькасць цеплыні Q падзяліць на масу цела m і на рознасць тэмператур $t_2^{\circ} - t_1^{\circ}$. Такім чынам,

$$c = \frac{Q}{m(t_2^{\circ} - t_1^{\circ})}.$$

Удзельныя цеплаёмкасці звычайна выражаюць у $\frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$ або ў $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.

Удзельная цеплаёмкасць вады пры награванні ад $19^{\circ},5\text{C}$ да $20^{\circ},5\text{C}$ роўна $1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$. Пры іншых тэмпературах яна адрозніваецца

ад $1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, але гэтае адрозненне вельмі нязначнае, і мы яго надалей улічваць не будзем. Наогул удзельная цеплаёмкасць любога рэчыва са змяненнем тэмпературы хоць і нязначная, але мяняецца.

У многіх выпадках пры разліках карыстаюцца сярэднім значэннем удзельнай цеплаёмкасці. Для некаторых рэчываў такія значэнні ўдзельнай цеплаёмкасці $\left(\text{у } \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}} \text{ або } \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right)$ прыведзены ў наступнай табліцы:

Вадарод 3,41	Лёд 0,48	Жалеза 0,11
Гелій 1,26	Паветра 0,24	Медзь 0,09
Спарт 0,58	Алюміній 0,22	Серабро 0,05
Эфір 0,56	Шкло 0,19	Ртуць 0,03
Карасін 0,51	Алмаз 0,12	Волава 0,05
		Свінец 0,03

Ведаючы ўдзельную цеплаёмкасць рэчыва, па формуле

$$Q = cm(t_2^{\circ} - t_1^{\circ})$$

можна разлічыць колькасць цеплыні, якая ідзе на награванне цела.

74. Вымярэнне ўдзельнай цеплаёмкасці. Для вымярэння ўдзельнай цеплаёмкасці цвёрдых, вадкіх і газападобных рэчываў існуюць розныя спосабы. Мы разгледзім найбольш просты спосаб вымярэння цеплаёмкасці цвёрдых рэчываў.

Выпрабоўваемае цела награвваюць да пэўнай тэмпературы і затым апускаюць яго ў спецыяльны прыбор — каларыметр, у які наліта пэўная колькасць вады (рыс. 129).

Калі вада ў каларыметры мае тэмпературу ніжэйшую, чым тэмпература апушчанага ў яе цела, то яна награвеаецца, а цела ахалоджваецца да таго часу, пакуль іх тэмпературы не стануць роўнымі. Колькасць цеплыні, аддадзеная цела, роўна колькасці цеплыні, атрыманай каларыметрам і вадой. Гэты доследны факт і дае магчымасць вызначыць удзельную цеплаёмкасць цела.

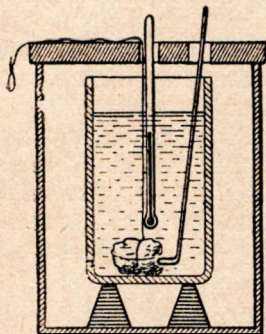


Рис. 129. Схема ўстаноўкі па вызначэнню удзельнай цеплаёмкасці рэчыва пры дапамозе каларыметра.

Няхай маса каларыметра роўна m_1 , яго ўдзельная цеплаёмкасць c_1 , маса вады ў каларыметры m_2 , удзельная цеплаёмкасць вады c , пачатковая тэмпература вады і каларыметра t_1° , маса выпрабаванага цела m , яго ўдзельная цеплаёмкасць c_x і пачатковая тэмпература t° , агульная тэмпература каларыметра і цела θ (грэч. «тэта»). Тады вынік указаўнага доследу можна выразіць ураўненнем:

$$c_x m (t^\circ - \theta^\circ) = c_1 m_1 (\theta_1 - t_1^\circ) + c m_2 (\theta^\circ - t_1^\circ) \cdot (1)$$

Гэта ўраўненне цеплавога балансу. Яно абазначае, што пры цеплаабмене паміж выпрабаваемым цела і каларыметрам колькасць цеплыні, аддадзеная цела, роўна колькасці цеплыні, атрыманай каларыметрам.

З ураўнення (1) вызначаецца шукаемая ўдзельная цеплаёмкасць:

$$c_x = \frac{c_1 m_1 (\theta^\circ - t_1^\circ) + c m_2 (\theta^\circ - t_1^\circ)}{m (t^\circ - \theta^\circ)}.$$

Трэба мець на ўвазе, што, акрамя абмену энергіяй паміж унесеным цела і каларыметрам, такі абмен магчым паміж цела і прадметамі, якія акружаюць каларыметр. Пры дакладных вымярэннях неабходна па магчымасці памяншаць страты энергіі і ўводзіць у вылічэнні папраўкі, якія ўлічваюць тую частку энергіі, што перадаецца ў працэсе доследу акружаючаму асяроддзю.

Практыкаванне 18.

1. Вызначыць, якая колькасць цеплыні патрэбна для нагрывання 425 г вады на 20°C .
2. На колькі градусаў нагрэюцца 5 кг вады, калі вада атрымае 40 ккал?
3. Колькі патрэбна калорый, каб m грамаў вады пры тэмпературы t_1 нагрэць да тэмпературы t_2 ?
4. У каларыметр наліта 2 кг вады пры тэмпературы 15°C . Да якой тэмпературы нагрэецца вада каларыметра, калі ў яе апусціць латунную гіру ў 500 г, нагрэтую да 100°C ? Удз. цеплаёмкасць латуні $0,088 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$
5. Ёсць аднолькавага аб'ёму кавалкі медзі, волава і алюмінію. Які з гэтых кавалкаў мае найбольшую і які найменшую цеплаёмкасць?
6. У каларыметр было наліта 450 г вады, тэмпература якой 20°C . Калі ў гэтую ваду апусцілі 200 г жалезных апілак, нагрэтых да 100°C , тэмпература вады стала 24°C . Вызначыць удзельную цеплаёмкасць апілак.
7. Медны каларыметр вагою 100 г умяшчае 738 г вады, тэмпература якой 15°C . У гэты каларыметр апусцілі 200 г медзі пры тэмпературы 100°C , пасля чаго тэмпература каларыметра паднялася да 17°C . Якая ўдзельная цеплаёмкасць медзі?

8. Стальны шарык масай 10 г вынялі з печы і апусцілі ў вяду пры тэмпературы 10°C. Тэмпература вады паднялася да 25°C. Якая была тэмпература печы, калі маса вады 50 г? Удз. цеплаёмкасць сталі $0,12 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$.

9. У жалезны кацёл масай 1,5 кг наліта 5 кг вады. Колькі патрэбна калорый, каб у гэтым катле нагрэць вяду ад 15°C да 100°C?

75. Развіццё поглядаў на прыроду цеплыні. У XVIII ст. панавала думка, што цеплыня ёсць асобая нябачная і бязважкая вадкасць, якая здольна пераходзіць з аднаго цела ў другое. Такая вадкасць, якую называлі цеплародам, знаходзілася, на думку прыхільнікаў гэтай гіпотэзы, ва ўсіх целах.

Гіпотэзы цеплароду ў свой час прытрымліваліся славуцы вучоныя — Ньютан, Лавуазье, Лаплас, Гей-Люсак і інш. Сама назва «цеплаёмкасць» уведзена была таму, што яна ўказвала на наяўнасць цеплароду.

У той час, як большасць вучоных XVIII ст. прымалі гіпотэзу цеплароду, супраць яе рашуча выступіў М. В. Ламаносаў.

У 1745 г. М. В. Ламаносаў апублікаваў работу «Разважанні аб прычыне цеплыні і холаду», якая пачыналася так: «Досыць вядома, што цяпло ўзбуджаецца рухам: рўкі ад узаемнага трэння саграваюцца, дрэва загараецца, іскры вылятаюць пры ўдары крэменем аб сталь, жалеза напальваецца пры каванні яго частымі, моцнымі ўдарамі; пасля спынення іх цяпло памяншаецца, і атрыманы агонь патухае... З усяго гэтага зусім відавочна, што ёсць дастатковая аснова цеплыні ў руху. А паколькі ніякі рух без матэрыі адбываецца не можа, то неабходна, каб дастатковая аснова цеплыні заключа-лася ў руху якой-небудзь матэрыі».

Па Ламаносаву, цеплыня ўзнікае ў целах у выніку надання ім руху; значыць, *сутнасць цеплыні — у руху частчак, якія ўтвараюць цела*.

Вучэнне Ламаносава аб прыродзе цеплыні знайшло прызнанне сярод рада буйнейшых вучоных яго часу. Так, напрыклад, вядомы матэматык і фізік Эйлер у пісьме да Ламаносава пісаў: «Кожны ведае, што трактаты аб прычынах цеплыні, якія з'явіліся да гэтага часу, яшчэ не растлумачылі цалкам гэты прадмет, і тыя, хто займаецца яго даследаваннем, заслугоўваюць найвялікшай пахвалы. Вам нельга не падзякаваць за тое, што вы рассялі цемру, якая пакрывала дасюль гэтае пытанне».

Ведаў аб працах Ламаносава і вядомы італьянскі фізік Вольта. У 1786 г. ён адзначыў «тую надзвычайную дасціпнасць, з якой пан Ламаносаў у свой час абвергнуў цепларод».

Далейшае развіццё і доследнае абгрунтаванне вучэнне аб прыродзе цеплыні знайшло ў працах англійскіх вучоных Румфарда і Дэві.

У 1798 г. Румфард пісаў: «Калі я прысутнічаў у мюнхенскім арсенале пры свідраванні гармат, мяне здзівіла высокая тэмпература, якую метал хутка набываў пры свідраванні, і яшчэ больш высокая тэмпература металічных стружак, якая перавышала тэмпературу кіпення вады».

Жадаючы пераканацца, ці існуе цепларод, Румфард прывёў рад доследаў, пры якіх старанна ізаляваў выпрабаваемы прадмет ад награвання якімі-небудзь ішчымі прадметамі. Ён свідраваў металічны цыліндр, змясціўшы яго ў скрынку, напоўненую халоднай вадой, і пераканаўся, што праз кароткі час вада пачынае кіпець. «Цяжка апісаць неўразуменне і здзіўленне, якія адбіліся на тварах прысутных, калі яны ўбачылі, што такая вялікая колькасць вады была даведзена да кіпення без дапамогі агню».

Румфард заўважыў, што чым больш працуе конь, які прыводзіць у рух свердзел, тым больш выдзяляецца цеплыні. На падставе гэтага назірання ён зрабіў вывад, што «нельга лічыць рэчывам тое, што можна атрымаць у неабмежаванай колькасці з ізаляванага цела, і нельга ўявіць сабе цеплыню інакш, чым некаторым рухам».

У 1802 г. Дэві паказаў на доследзе, што пры трэнні двух кавалаў лёду ўтвараецца вада, цеплаёмкасць якой у два разы большая, чым цеплаёмкасць лёду. Гэты дослед Дэві паўтарае, змяшчаючы кавалак лёду пад каўпак паветранага насоса. І ў гэтым выпадку, хоць лёд не мог ніадкуль атрымаць «цеплароду», ён ператвараецца ў ваду, на што затрачваецца цеплыня.

Нягледзячы на пераканаўчасць довадаў Ламаносова, Румфарда, Дэві, якія абвяргалі існаванне цеплароду, гіпотэза цеплароду яшчэ досыць доўга існавала ў навуцы. Для доказу яе негрунтоўнасці спатрэбіліся новыя доследы, новыя навуковыя даследаванні.

76. Механічны эквівалент цеплыні. У пачатку XIX ст. у прамысловасць і транспарт шырока ўкараняюцца паравыя рухавікі. Адначасова даследуюцца магчымасці павышэння іх эканамічнасці. У сувязі з гэтым перад фізікай і тэхнікай ставіцца пытанне вялікай практычнай важнасці: як пры найменшай затраце паліва ў машыне можна выканаць больш работы.

Першы крок у вырашэнні гэтай задачы зрабіў французскі інжынер Садзі Карно ў 1824 г., вывучаючы пытанне аб каэфіцыенце карыснага дзеяння паравых машын.

У 1842 г. нямецкі вучоны Роберт Майер тэарэтычна вызначыў, якую колькасць механічнай работы можна атрымаць пры затраце адной кілокалорыі цеплыні.

У аснову сваіх разлікаў Майер паклаў адрозненне ў цеплаёмкасцях газу.

У газай адрозніваюць дзве цеплаёмкасці: цеплаёмкасць пры пастаянным ціску (c_p) і цеплаёмкасць пры пастаянным аб'ёме (c_v).

Цеплаёмкасць газу пры пастаянным ціску вымяраецца колькасцю цеплыні, якая ідзе на награванне дадзенай масы газу на 1°C без змянення яго ціску.

Цеплаёмкасць жа пры пастаянным аб'ёме лікава роўна колькасці цеплыні, якая ідзе на награванне дадзенай масы газу на 1°C без змянення аб'ёму, займаемага газам.

У кожнага газу цеплаёмкасць пры пастаянным ціску большая за цеплаёмкасць пры пастаянным аб'ёме. Так, напрыклад, для паветра ўдзельныя цеплаёмкасці

$$c_p \text{ і } c_v \text{ маюць наступныя значэнні: } c_p = 0,2376 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}; \quad c_v = 0,1690 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Тлумачыцца гэтая розніца ў цеплаёмкасцях газу наступным чынам. Пры награванні газу пры пастаянным аб'ёме павялічваецца толькі ўнутраная энергія газу.

Пры награванні ж газу пры пастаянным ціску павялічваецца, як і ў першым выпадку, унутраная энергія газу, але апрача гэтага, газ пры расшырэньні выконвае работу.

Прасочым ход разважанняў Майера.

Допусцім, што ў сасудзе (рыс. 130), плошча асновы якога 1 м^2 , змешчана пры тэмпературы 0° і ціску 760 мм 1 м^3 паветра. Паветра, што змяшчаецца ў сасудзе, закрыта поршнем АВ, які Майер у сваіх разважаннях лічыў бязважкім.

Маса 1 м^3 паветра роўна $1,293 \text{ кг}$. Калі нагрэць гэтае паветра на 1°C , то яно расшырыцца і падые

поршань на $\frac{1}{273} \text{ м} = 0,00366 \text{ м}$ (у становішча A_1B_1).

Перамяшчаючы поршань, паветра ў сасудзе выконвае работу па пераадоленню сілы атмасфернага ціску. Паколькі атмасферны ціск роў

вен $1,0332 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$, то сіла, якая дзейнічае на поршань зверху, роўна:

$$1,0332 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \cdot 10\,000 \text{ см}^2 = 10\,332 \text{ кг}.$$

Работа, якая выконваецца расшыраючымся паветрам па пераадоленню гэтай сілы, роўна:

$$10\,332 \text{ кг} \cdot 0,00366 \text{ м} = 37,82 \text{ кгм}.$$

Колькасць цеплыні, якая ідзе на награванне паветра ў сасудзе пры пастаянным ціску, роўна:

$$0,2376 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,293 \text{ кг} \cdot 1 \text{ град} = 0,3071 \text{ ккал}.$$

Для награвання ж гэтай колькасці паветра пры пастаянным аб'ёме патрэбна:

$$0,1690 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \cdot 1,293 \text{ кг} \cdot 1 \text{ град} = 0,2185 \text{ ккал}.$$

За кошт колькасці цеплыні $0,3071 \text{ ккал} - 0,2185 \text{ ккал} = 0,0886 \text{ ккал}$ газ выканаў работу, роўную $37,82 \text{ кгм}$.

З гэтых разлікаў вынікае, што $0,0886 \text{ ккал}$ эквівалентны $37,82 \text{ кгм}$. Адсюль колькасць механічнай работы, эквівалентная 1 ккал цеплыні, роўна:

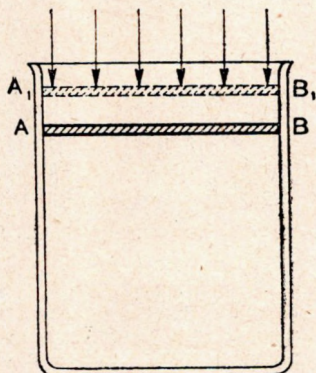
$$\frac{37,82 \text{ кгм}}{0,0886 \text{ ккал}} \approx 427 \frac{\text{кгм}}{\text{ккал}}.$$

Унутраную энергію цела, як было ўстаноўлена ў § 71, можна змяняць двума шляхамі: шляхам выконвання работы і шляхам цеплаперадачы.

Колькасць механічнай работы, якая выклікае такое ж змяненне ўнутранай энергіі цела, як і надаванне яму адзінкі колькасці цеплыні, называецца механічным эквівалентам цеплыні.

Доследныя вызначэнні механічнага эквіваленту цеплыні ўпершыню былі праведзены Джоўлем у герыяд з 1840 па 1849 г. Адзін з найбольш вядомых яго спосабаў вызначэння механічнага эквіваленту цеплыні заключаўся ў наступным (рыс. 131).

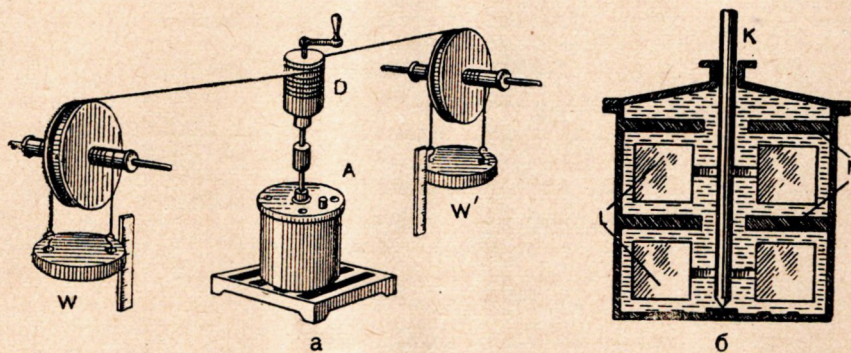
У каларыметр А (разрэз яго паказан на рыс. 131, б) налівалася вада. Падаючыя грузы W і W' прыводзілі ў вярчэнне вось K з лапачкамі L . Каларыметр меў перагародкі N ; ён быў пабудаван так для таго, каб павялічыць трэнне рухомай часткі прыбора аб ваду. У вы-



Рыс. 130. Рисунак, які тлумачыць тэарэтычны разлік Майера механічнага эквіваленту цеплыні.

ніку трэння лапатчак аб ваду апошняя награвалася (тэмпература ўнутры каларыметра вымяралася тэрмометрам).

Па вышыні падзення h і масе грузаў m падлічвалася зробленая работа $A=mgh$. Па павышэнню тэмпературы ў каларыметры падліч-



Рыс. 131. Схема доследу Джоуля па вызначэнні механічнага эквіваленту цеплыні (а). Каб вада не захоплівалася рухам лапатчак, каларыметр быў падзелен перагародкамі з выразамі ў іх для праходжання лапатчак (б).

валася колькасць цеплыні Q , выдзеленая пры трэнні рухомай часткі каларыметра аб ваду. На гэтую велічыню павялічвалася ўнутраная энергія вады.

Шматлікія вымярэнні паказалі, што адносіна работы A да колькасці цеплыні Q , на якую павялічвалася ўнутраная энергія вады ў выніку выканання гэтай работы, уяўляе пастаянную велічыню. Гэтая велічыня і з'яўляецца механічным эквівалентам цеплыні. Механічны эквівалент абазначаецца літарай J :

$$J = 427 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{ккал}} = 4,182 \frac{\text{дж}}{\text{кал}}.$$

Джоуль Джэмс Прэскот (1818—1889) — выдатны англійскі фізік, адыграў вялікую ролю ў доследным абгрунтаванні закону захавання і ператварэння энергіі.

Ён упершыню дакладна вызначыў на доследзе механічны эквівалент цеплыні. Адначасова з рускім фізікам Э. Х. Ленцам адкрыў закон, які вызначае колькасць цеплыні, што выдзяляецца электрычным токам пры праходжанні па правадніку. Сумесна з В. Томсанам адкрыў з'яву паніжэння тэмпературы газу пры яго расшырэнні.

Імем Джоуля названа адзінка работы *джоуль*.

Джоуль замяняў ваду ртуцю і атрымліваў той жа рэзультат. Нарэшце, замест работы трэння лапатчак аб ваду Джоуль утвараў у



калориметры роботу трэння двух кавалкаў металу; вымярэнні далі тую ж велічыню механічнага эквіваленту цеплыні.

Ведаючы механічны эквівалент цеплыні, лёгка выразіць адзінку вымярэння колькасці цеплыні праз адзінкі работы:

$$1 \text{ кал} = 4,182 \text{ дж, або } 1 \text{ ккал} = \frac{1}{860} \text{ квт-гадз.}$$

77. Закон захавання і ператварэння энергіі. Разгледзім больш падрабязна апісаны вышэй дослед Джоуля. У гэтым доследзе патэнцыяльная энергія падаючых грузаў ператваралася ў кінетычную энергію лапатак, якія верцяцца, дзякуючы рабоце супраць сіл трэння кінетычная энергія лапатак ператваралася ва ўнутраную энергію вады. Мы сустракаемся тут з выпадкам ператварэння аднаго віду энергіі ў другі. Патэнцыяльная энергія падаючых грузаў ператвараецца ва ўнутраную энергію вады, колькасць цеплыні Q з'яўляецца мерай ператворанай энергіі. Такім чынам, колькасць патэнцыяльнай энергіі захоўваецца пры яе ператварэннях у іншыя віды энергіі.

Натуральна паставіць пытанне: ці захоўваюцца пры ператварэннях колькасці іншых відаў энергіі, напрыклад кінетычнай, электрычнай і г. д.? Дапусцім, што ляціць куля масай m са скорасцю v . Яе кінетычная энергія роўна $\frac{mv^2}{2}$. Куля трапіла ў які-небудзь прадмет з масай M і засела ў ім. Кінетычная энергія кулі ператвараецца пры гэтым ва ўнутраную энергію кулі і прадмета, вымяраемую колькасцю цеплыні Q , якая вылічваецца па вядомай формуле (§ 73). Калі кінетычная энергія пры ператварэнні ва ўнутраную энергію не страчваецца, то павінна мець месца роўнасць:

$$\frac{mv^2}{2} = J \cdot Q.$$

Дослед пацвярджае гэты вывад. Захоўваецца і колькасць кінетычнай энергіі.

Пры праходжанні электрычнага току праваднік награвяецца: электрычная энергія ператвараецца ва ўнутраную энергію правадніка. Дослед паказвае, што пры рабоце электрычнага току ў 1 квт-гадз атрымліваецца заўсёды колькасць цеплыні, роўная 860 ккал. Такім чынам, захоўваецца і колькасць электрычнай энергіі. Гэты вывад адносіцца да ўсіх відаў энергіі.

Тысячагадовая практыка паказала, што ні адзін з відаў энергіі ніколі не ўзнікае з нічога. Гэтае палажэнне пацвярджаецца фактам немагчымасці ажыццяўлення вечнага рухавіка (гл. ч. 1, § 78). Вялікі доследны матэрыял паказваў таксама, што энергія і не знікае пры ўсіх сваіх ператварэннях. Усе з'явы прыроды адбываюцца ў адпаведнасці з законам захавання і ператварэння энергіі, які фармулюецца так:

Ва ўсіх працэсах, якія адбываюцца ў прыродзе, энергія не ўзнікае і не знікае, яна толькі ператвараецца з аднаго віду ў другі ў эквівалентных колькасцях.

Усе формы энергіі: кінетычная, патэнцыяльная, электрамагнітная, хімічная, унутрыатамная і інш. — здольны ператварацца адна ў другую.

Іменна магчымасць узаемага ператварэння ўсіх форм энергіі абумоўлівае багацце і разнастайнасць з'яў прыроды.

Для ілюстрацыі гэтага вялікага закону прыроды разгледзім некалькі прыкладаў.

Сонечныя праменні нясуць пэўны запас энергіі. Падаючы на паверхню Зямлі, праменні награвваюць яе. Энергія сонечных праменняў пры гэтым ператвараецца ва ўнутраную энергію глебы і цел, якія знаходзяцца на паверхні Зямлі. Апошняя перадаецца паветру, якое акружае Зямлю; паветраныя масы прыходзяць у рух, паяўляюцца вепер—адбываецца ператварэнне ў механічную (кінетычную) энергію. Частка энергіі сонечных праменняў паглынаецца на паверхні Зямлі лісцямі раслін; пры гэтым у раслінах адбываюцца складаныя хімічныя рэакцыі, у выніку якіх утвараюцца арганічныя злучэнні—адбываецца ператварэнне ў хімічную энергію.

У § 57 і 58 гаварылася аб выкарыстанні энергіі рухаючайся вады; апошняя ўзнікае таксама ў выніку ператварэння энергіі сонечнага спрамянення.

Нарэшце, у цяперашні час навука авалодвае магчымасцямі ператварэння ўнутрыатамнай энергіі ў іншыя патрэбныя для практыкі віды энергіі.

Закон захавання і ператварэння энергіі шырока выкарыстоўваецца пры даследаванні з'яў прыроды. Гэты закон уяўляе сабой навуковую аснову для разнастайных разлікаў ва ўсіх галінах тэхнікі.

Практыкаванне 19.

1. Стальны шарык вагою 50 г падае з вышыні 1,5 м на каменную пліту і, адскокваючы ад яе, падымаецца на вышыню 1,2 м. Чаму шарык не падняўся на ранейшую вышыню? Якая колькасць механічнай энергіі ператварылася ва ўнутраную энергію шарыка і пліты?

2. У шклянны сасуд накачалі паветра да ціску ў 1,5 атм. Калі адкрылі крап, унутры сасуда паявіўся туман, які паказвае, што паветра ахаладзілася. Чаму паветра ахаладзілася?

3. Якой колькасці работы эквівалентна колькасць цеплыні, якая атрымліваецца пры згаранні 1 кг вугалю? Цеплатворная здольнасць вугалю роўна $7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

4. Якой колькасці цеплыні адпавядае работа каня, які перасоўвае на адлегласці 40 м ваганетку, прыкладаючы намаганне ў 50 кг?

5. Якая колькасць цеплыні выдзяляецца пры падзенні няпругкага цела масай у 50 кг з вышыні 4 м?

6. Колькі патрэбна вугалю на к. с. у гадзіну, калі каэфіцыент карыснага дзеяння машыны 20%?

7. Колькі патрэбна нафты на рэйс парахода, які працягваецца 6 сутак, калі машына парахода развівае сярэдняю карысную магутнасць у 4000 к. с. і каэфіцыент карыснага дзеяння 20%? Цеплатворная здольнасць гаручага $11000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

8. Колькі цеплыні выдзяляецца пры ўдары молата вагою ў 4,9 кг аб прадмет, які ляжыць на кавадле, калі скорасць молата ў момант удару $6 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$?

9. Колькі патрэбна вугалю для паравоза магутнасцю ў 1500 к. с., які ідзе са скорасцю $40 \frac{\text{км}}{\text{гадз}}$, на праезд 200 км? Каэфіцыент карыснага дзеяння паравоза 10%.

РАЗДЕЛ VII.

ЦЕПЛАВОЕ РАСШЫРЭННЕ ЦВЁРДЫХ І ВАДКІХ ЦЕЛ.

78. Залежнасць аб'ёму цел ад тэмпературы. Частачкі цвёрдага цела займаюць адна адносна другой пэўныя становішчы, але не застаюцца ў спакоі, а ўтвараюць ваганні. Пры награванні цела павялічваецца сярэдняя скорасць руху частачак. Сярэднія адлегласці паміж частачкамі пры гэтым павялічваюцца, таму павялічваюцца лінейныя размеры цела, а значыць, павялічваецца і аб'ём цела.

Пры ахаладжэнні лінейныя размеры цела скарачаюцца і аб'ём яго памяншаецца.

Пры награванні, як вядома, целы расшыраюцца, а пры ахаладжэнні сціскаюцца. Якасны бок гэтых з'яў быў ужо разгледжан у пачатковым курсе фізікі.

Наша задача цяпер — азнаёміцца з колькаснымі законамі гэтых з'яў.

79. Лінейнае расшырэнне цвёрдых цел. Цвёрдае цела пры дадзенай тэмпературы мае пэўную форму і пэўныя лінейныя размеры. Павелічэнне лінейных размераў цела пры награванні называецца цеплавым лінейным расшырэннем.

Вымярэнні паказваюць, што адно і тое ж цела расшыраецца пры розных тэмпературах па-рознаму: пры высокіх тэмпературах звычайна больш, чым пры нізкіх. Але гэтая розніца ў расшырэнні такая невялікая, што пры параўнальна невялікіх змяненнях тэмпературы яе можна пад увагу не прымаць і лічыць, што змяненне размераў цела прапарцыянальна змяненню тэмпературы.

У пачатковым курсе фізікі было ўстаноўлена, што розныя рэчывы па-рознаму расшыраюцца пры награванні: адны больш, другія менш; жалеза, напрыклад, расшыраецца больш за шкло і менш за медзь.

Каб колькасна ахарактарызаваць гэтую важную цеплавую ўласцівасць цел, уведзена асобая велічыня, якая называецца каэфіцыентам лінейнага расшырэння.

Няхай цвёрдае цела пры тэмпературы 0°C мае даўжыню l_0 , а пры тэмпературы t° яго даўжыня роўна l_t . Значыць, пры змяненні тэмпературы на t° даўжыня цела павялічваецца на $l_t - l_0$. Дапускаючы, што павелічэнне даўжыні пры награванні на кожны градус ідзе раўнамерна,

знаходзім, што пры награванні на 1°C уся даўжыня цела павялічылася на $\frac{l_t - l_0}{t}$, а кожная адзінка даўжыні на

$$\beta = \frac{l_t - l_0}{l_0 t}. \quad (1)$$

Велічыня β (грэч. «бэта»), якая характарызуе цеплавое расшырэнне цела, называецца каэфіцыентам лінейнага расшырэння.

Формула (1) паказвае, што пры $t=1^{\circ}\text{C}$ і $l_0=1$ адз. даўжыні велічыня β роўна $l_t - l_0$, г. зн. **каэфіцыент лінейнага расшырэння лікава ровен падаўжэнню, якое атрымлівае пры награванні на 1°C стрыжань, што меў пры 0°C даўжыню, роўную адзінцы даўжыні.**

З формулы (1) вынікае, што назвай каэфіцыента расшырэння β з'яўляецца $\frac{1}{\text{град}}$.

Формулу (1) можна запісаць у наступным выглядзе:

$$l_t = l_0(1 + \beta t).$$

Адсюль лёгка вызначыць даўжыню цела пры любой тэмпературы, калі вядомы яго пачатковая даўжыня і каэфіцыенты лінейнага расшырэння.

Ніжэй у табліцы прыведзены каэфіцыенты лінейнага расшырэння некаторых рэчываў, вызначаныя на доследзе.

Рэчывы	Каэфіц. лінейнага расшырэння $\left(\frac{1}{\text{град}}\right)$	Рэчыва	Каэфіц. лінейнага расшырэння $\left(\frac{1}{\text{град}}\right)$
Латунь	0,000018	Інвар (сплаў 63,2%	0,0000015
Медзь	0,000017	Fe, 36,1% Ni, 0,39%	
Жалеза	0,000012	Cu, 0,39% Mn) . . .	
Шкло	0,000009		0,0000005
Плаціна	0,000009	Кварцавае шкло . .	

80. Аб'ёмнае расшырэнне цвёрдых цел. Пры цеплавым расшырэнні цвёрдага цела з павелічэннем лінейных размераў цела павялічваецца і яго аб'ём. Аналагічна каэфіцыенту лінейнага расшырэння для характарыстыкі аб'ёмнага расшырэння можна ўвесці каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння. Дослед паказвае, што гэтак жа, як і ў выпадку лінейнага расшырэння, можна без вялікай памылкі прыняць, што прырашчэнне аб'ёму цела прапарцыянальна павышэнню тэмпературы.

Абазначыўшы аб'ём цела пры 0°C праз V_0 , аб'ём пры тэмпературы t° праз V_t , а каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння праз α , знойдзем:

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t}. \quad (2)$$

Пры $V_0=1$ адз. аб'ёму і $t=1^{\circ}\text{C}$ велічыня α роўна $V_t - V_0$, г. зн. **каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння лікава ровен прыросту аб'ёму, якое атрымлівае пры награванні на 1°C аб'ём, роўны адзінцы аб'ёму.**

ту аб'ёму цела пры награванні на 1°C , калі пры 0°C аб'ём быў ровен адзінцы аб'ёму.

Па формуле (2), ведаючы аб'ём цела пры тэмпературы 0°C , можна вылічыць аб'ём яго пры любой тэмпературы t° :

$$V_t = V_0(1 + \alpha t).$$

Устанавім суадносіны паміж каэфіцыентамі аб'ёмнага і лінейнага расшырэння.

Дапусцім, што маем кубік, кант якога пры 0°C ровен 1 см. Пры награванні на 1°C кант зробіцца роўным $(1 + \beta)$ см, а аб'ём кубіка павялічыцца на α см³.

Можна напісаць наступную роўнасць:

$$1 + \alpha = (1 + \beta)^3.$$

Але

$$(1 + \beta)^3 = 1 + 3\beta + 3\beta^2 + \beta^3.$$

У гэтай формуле велічыні β^2 і β^3 настолькі малыя, што іх можна апусціць і напісаць:

$$1 + \alpha = 1 + 3\beta, \text{ або } \alpha = 3\beta.$$

Каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння цвёрдага цела ровен патроенаму каэфіцыенту лінейнага расшырэння.

81. Улік цеплавога расшырэння ў тэхніцы. З табліцы на старонцы 120 відаць, што каэфіцыенты расшырэння цвёрдых цел вельмі малыя. Аднак самыя нязначныя змяненні размераў цел пры змяненні тэмпературы выклікаюць паяўленне велізарных сіл.

Дослед паказвае, што нават для невялікага падаўжэння цвёрдага цела патрэбны вялікія знешнія сілы. Так, напрыклад, каб павялічыць даўжыню жалезнага стрыжня сячэннем у 1 см² прыблізна на 0,0005 яго першапачатковай даўжыні, неабходна прыкладзі сілу ў 1000 кг. Але такой жа велічыні расшырэнне гэтага стрыжня атрымаецца пры награванні яго на 50°C . Зразумела таму, што, расшыраючыся пры награванні (або сціскаючыся пры ахаладжэнні) на 50°C , стрыжань будзе аказваць ціск каля 1000 $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ на тые целы, якія будуць перашкаджаць яго расшырэнню.

Велізарныя сілы, якія ўзнікаюць пры расшырэнні і сцісканні цвёрдых цел, улічваюцца ў тэхніцы. Так, напрыклад, адзін з канцоў моста не замацоўваюць нерухома, а ўстанаўліваюць на катках; чыгуначныя рэйкі не ўкладваюць ушчыльную, а пакідаюць паміж імі прасвет; парправоды падвешваюць на круках, а паміж асобнымі трубама ўстанаўліваюць кампенсатары, якія выгінаюцца пры падаўжэнні труб парправода. З гэтай жа прычыны кацёл паравоза замацоўваецца толькі на адным канцы, другі ж яго канец можа свабодна перамяшчацца.

Велізарнае значэнне мае расшырэнне ад награвання пры дакладных вымярэннях. Сапраўды, калі маштабная лінейка або калібр, якімі правяраюцца размеры зробленай часткі машыны, значна змяняюць сваю велічыню, то неабходнай дакладнасці пры вымярэнні не атры-

маецца. Для таго каб пазбегнуць грубых памылак пры вымярэнні або кантролі, гатовыя вырабы загодзя прыносяць у памяшканне, дзе робяцца вымярэнні, каб яны паспелі прыняць тэмпературу калібраў. Самыя калібры і вымяральныя інструменты робяць з матэрыялу з вельмі малым каэфіцыентам расшырэння. Такім матэрыялам, напрыклад, з'яўляецца асобая жалеза-нікелевая сталь—інвар, з каэфіцыентам расшырэння 0,0000015.

Як паказвае табліца на стар. 120, плаціна і шкло маюць аднолькавы каэфіцыент расшырэння; таму можна ўплаўляць плаціну ў шкло, прычым пасля ахаладжэння не адбываецца ні аслаблення сувязі абодвух рэчываў, ні растрэскавання шкла. У электрычных лямпачках ў шкло ўплаўляецца жалеза-нікелевы дрот, які мае такія ж каэфіцыенты расшырэння, як і шкло.

Заслугоўвае ўвагі вельмі малы каэфіцыент расшырэння ў кварцавага шкла. Такое шкло вытрымлівае, не лопаючыся і не растрэскаючыся, нераўнамернае награванне або ахаладжэнне. Так, напрыклад, у распаленую дачырвана колбачку з кварцавага шкла можна ўліваць халодную ваду, тады як колба са звычайнага шкла пры такім доследзе лопаецца. Указаная асаблівасць кварцавага шкла з'яўляецца выні-

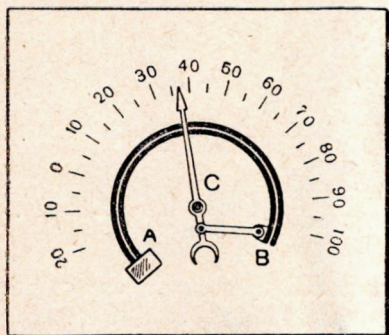


Рис. 132а. Схема будовы металічнага тэрмометра.

кам маласці яго каэфіцыента цеплага расшырэння.

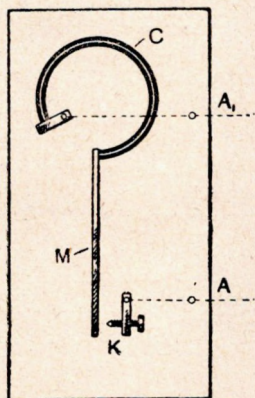
81а. Тэрмарэгулятар. Дзве аднолькавыя палоскі з розных металаў, напрыклад з жалеза і латуні, скляпаныя разам, утвараюць так званую біметалічную пласцінку. Пры награванні такія пласцінкі выгинаюцца з прычыны таго, што адна расшыраецца больш за другую. Тая з палосак, якая расшыраецца больш, аказваецца заўсёды з выпуклага боку. Гэтая ўласцівасць біметалічных пласцінак шырока выкарыстоўваецца для вымярэння тэмпературы і яе рэгулявання.

1. Металічны тэрмометр. Гэты прыбор уяўляе сабой біметалічную дугу (рис. 132а), канец якой А трывала замацаван, а канец В свабодны. Дуга злучана ў В са стрэлкай С. Пры змяненні тэмпературы дуга закручваецца або раскручваецца, рухаючы адпаведна стрэлку. Шкала праградуіравана па звычайнаму тэрмометру. Калі да канца стрэлкі прымацаваць пяро, то ваганні тэмпературы можна запісваць на спецыяльнай папяровай стужцы. На такім прыцыпе пабудаван тэрмаграф.

2. Тэрмастат. Так называецца прыбор для ўстанаўлення пастаяннай тэмпературы.

На рис. 132б паказан прынцып будовы аднаго з тыпаў рэгулятара тэмпературы. Біметалічная дуга С пры змяненні тэмпературы закручваецца або раскручваецца. Да яе свабоднага канца прымацавана

металічная пласцінка M , якая пры раскручванні дугі датыкаецца да кантакта K , а пры закручванні адыходзіць ад яго. Калі, напрыклад, кантакт K і пласцінка M далучаны да канцоў электрычнага ланцуга AA_1 , які змяшчае награвальны прыбор, то пры судакрананні K і M электрычны ланцуг замкнецца; прыбор пачне награванне памяшканне. Біметалічная дуга C пры награванні пачне закручвацца і пры пэўнай тэмпературы адлучыць пласцінку M ад кантакта K ; ланцуг разарвецца, награванне спыніцца.



Рыс. 1326. Прынцып будовы рэгулятара тэмпературы з біметалічнай пласцінкай.

82. Цеплавое расшырэнне вадкасцей. У адносінах вадкасцей мае сэнс гаварыць толькі аб аб'ёмным расшырэнні. У вадкасцей яно значна большае, чым у цвёрдых цел. Як паказвае дослед, залежнасць аб'ёму вадкасці ад тэмпературы выражаецца такой жа формулай, што і для цвёрдых цел.

Калі пры 0°C вадкасць займае аб'ём V_0 , то пры тэмпературы t яе аб'ём V_t будзе:

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t)$$

Для вымярэння каэфіцыента расшырэння вадкасці прымяняецца шкляны сасуд тэрмометрычнай формы, аб'ём якога вядомы (рыс. 132в). Шарык з трубкай напаўняюць даверху вадкасцю і награвваюць увесь прыбор да пэўнай тэмпературы; пры гэтым частка вадкасці выліваецца з сасуда. Затым сасуд з вадкасцю ахаладжваюць у растаючым лёдзе да 0° . Пры гэтым вадкасць напоўніць ужо не ўвесь сасуд, і незапоўнены аб'ём пакажа, на колькі вадкасць расшырылася пры награванні. Ведаючы каэфіцыент расшырэння шкла, можна досыць дакладна вылічыць і каэфіцыент расшырэння вадкасцей.



Рыс. 132в. Прыбор для вызначэння каэфіцыента расшырэння вадкасцей.

Каэфіцыент расшырэння некаторых вадкасцей:

Эфір	0,00166	Вада (ад 20°C і вышэй)	0,00020
Спірт	0,00110	Вада (ад 5° да 8°C)	0,00002
Карасін	0,00100	Ртуть	0,00018

Расшырэнне вады пры награванні адрозніваецца ад расшырэння іншых вадкасцей. Калі награванне вады ад 0°C , то можна заўважыць, што пры награванні да 4°C яе аб'ём не павялічваецца, а памяншаецца. Пры награванні ж вышэй 4°C аб'ём вады павялічваецца. Найбольшую

шчыльнасць, роўную $1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$, вада мае пры 4°C . Змяненне шчыльнасці вады ў залежнасці ад тэмпературы паказана графічна на рыс. 133.

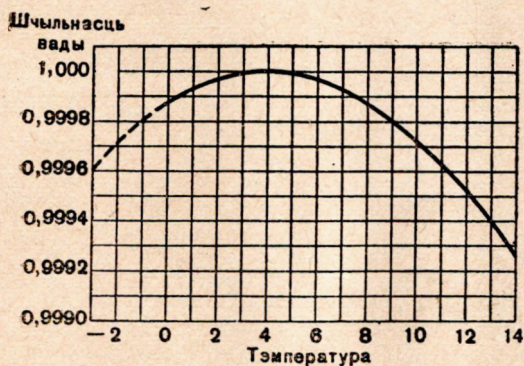


Рис. 133. Графік змянення шчыльнасці вады ў залежнасці ад тэмпературы.

Асаблівасцю расшырэння вады тлумачыцца тое, што вада ў сажалках і азёрах не прамярзае зімою да дна. Пры ахаладжэнні вады ўвосень верхнія астыўшыя слаі апускаюцца на дно, а на іх месца знізу паступаюць больш цёплыя слаі. Такое перамяшчэнне слаёў адбываецца толькі да таго часу, пакуль вада не прыме тэмпературы 4°C . Пры далейшым ахаладжэнні верхнія слаі не апускаюцца ўніз, а, паступова

ахалоджваючыся, застаюцца наверх і, нарэшце, замярзаюць.

Практыкаванне 20.

1. Парапрагодная жалезная труба даўжынёю ў 10 м награвецца ад тэмпературы 0° да 100°C . На колькі змяняецца даўжыня трубы?

2. Пры награванні тэрмометра аб'ём шкляной поласці тэрмометра, які ўмяшчае ртуть, павялічваецца. Чаму слупок ртуті ў тэрмометры ўсё ж падымецца?

3. Мерная колба, якая называецца пікнометрам, пры тэмпературы 0°C умяшчае 340 г ртуті, а пры тэмпературы 100°C умяшчае 335 г. Вызначыць каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння матэрыялу сасуда.

4. Выразіць шчыльнасць цела D_t пры тэмпературы t праз шчыльнасць яго D_0 пры тэмпературы 0° .

РАЗДЗЕЛ VIII.

УЛАСЦІВАСЦІ ГАЗАЎ.

83. Ціск газаў. Усякі газ утварае ціск на абалонку, унутры якой ён знаходзіцца.

Ціск, утвараемы газам на сценкі сасуда, тлумачыцца ўдарамі рухаючыхся малекул.

Пры ўдары аб сценку малекулы газу аддаюць ёй пэўную колькасць руху; сценка адчувае пры гэтым дзеянне некаторай сілы.

Удар кожнай асобнай малекулы аб сценку сасуда ўтварае вельмі невялікае дзеянне. Але малекул газу вельмі многа, удары аб сценкі сасуда адбываюцца бесперапынна, таму ў выніку атрымліваецца значны ціск.

Хаатычнасць руху малекул прыводзіць да таго, што ціск газу аднолькавы ва ўсіх напрамках.

Пры награванні ціск газу павялічваецца. Паколькі пры гэтым лік малекул газу не змяняецца, то павелічэнне ціску можна растлумачыць толькі тым, што ўдары малекул аб сценкі сасуда, у якім знаходзіцца газ, робяцца пры награванні больш частымі і што кожны ўдар становіцца мацнейшым. Удары ж могуць стаць больш частымі і моцнымі, калі павялічваецца скорасць руху малекул. Гэта пацвярджаецца, як мы бачылі (раздз. V), шматлікімі доследамі.

84. Залежнасць паміж аб'ёмам і ціскам газу. Закон Бойля—Марыёта. Стан газу вызначаецца яго аб'ёмам, ціскам і тэмпературай. Пры змяненні гэтых велічынь мяняецца і стан газу. Мы будзем разглядаць паслядоўна працэсы, пры якіх адна з велічынь, што характарызуюць стан газу, пастаянная, а дзве іншыя мяняюцца.

Вывучым спачатку такі працэс, пры якім ціск і аб'ём газу змяняюцца, а тэмпература застаецца пастаяннай. Такі працэс называецца іза тэрмічным¹.

Такім чынам, разгледзім, як змяняецца ціск дадзенай масы газу пры змяненні яго аб'ёму, калі тэмпература газу не мяняецца.

Доследы, якія ўстанаўліваюць гэтую залежнасць, можна зрабіць на прыборы, тры становішчы якога паказаны на рыс. 134. У гэтым

¹ Ад грэч. слоў: іза—роўны, тэрмас—цёплы.

прыборы шкляная трубка *A* злучаецца гумавай трубкай з другой шкляной трубкай *B*. Трубка *A* зверху мае кран *a*, абедзве трубки напаўняюцца ртутцю.

Адкрыем кран *a* і ўстанавім трубку *B* так, каб узровень ртутці ў трубки *A* быў, напрыклад, на сярэдзіне трубки (становішча I).

Ціск над ртутцю ў абедзвюх трубках атмасферны; дапусцім, што ён ровен 76 см рт. слупа. Закрыйм цяпер кран, абдзяліўшы гэтым масу паветра ў трубки *A* ад атмасфернага паветра. Такім чынам, у гэтай стадыі доследу мы будзем мець у трубки *A* пэўную масу паветра, якая знаходзіцца пад ціскам $p_1 = 76$ см рт. слупа.

Падымем цяпер трубку *B* уверх на столькі, каб аб'ём паветра ў трубки *A* паменшыўся ўдвая (становішча II). Узровень ртутці ў трубки *B* пры гэтым значна падымецца над узроўнем у трубки *A*.

Разгледзім цяпер, чаму будзе ровен ціск паветра ў трубки *A*. Гэты ціск ураўнаважвае атмасферны ціск і ціск усяго слупа ртутці ў трубки *B*, які стаіць вышэй узроўню n_1 ; вышыня гэтага слупа $n_1 n$ аказваецца роўнай 76 см. Такім чынам, ціск паветра ў трубки *A* ўраўнаважвае не адну, як у першым выпадку, а дзве атмасферы ($p_2 = 2$ ат).

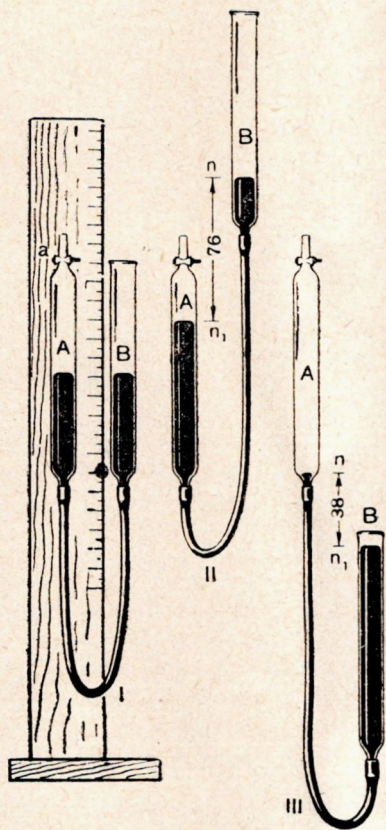
Значыць, з памяншэннем аб'ёму дадзенай масы газу ў два разы ціск яго павялічваецца ў два разы. Калі паменшыць аб'ём газу ў 1,5; 2,5; 3 разы, то адпаведна ў 1,5; 2,5; 3 разы павялічыцца яго ціск.

Апусцім цяпер трубку *B* так, каб маса паветра ў трубки *A* заняла ўдвая большы аб'ём (становішча III).

Узровень ртутці ў трубки *A* пры гэтым панізіцца. Атмасферны ціск цяпер ураўнаважвае ціск паветра ў трубки *A* і ціск слупа ртутці ад узроўню n у трубки *A* да ўзроўню n_1 у трубки *B*. Вымярэнні паказваюць, што вышыня гэтага слупа ртутці роўна 38 см. Ціск, утвараемы паветрам у трубки *A*, знойдзем, калі адымем ад атмасфернага ціску ціск слупа ртутці: $p_3 = 76$ см — 38 см = 38 см; значыць, $p_3 = 0.5$ ат.

Такім чынам, пры павелічэнні аб'ёму газу ў два разы яго ціск паменшыўся ў два разы.

Перамяшчаючы трубку *B* у розныя становішчы і адлічваючы



Рыс. 134. Прыбор для ўстанаўлення залежнасці паміж аб'ёмам і ціскам газу (у трох становішчах).

кожны раз аб'ём і ціск паветра ў трубы А, знойдзем, што пры памяншэнні аб'ёму даследуемай масы паветра ў некаторы лік разоў ціск яго павялічваецца ў столькі ж разоў. Тэмпература паветра пры ўсіх доследах застаецца пастаяннай.

Доследы, праведзеныя з іншымі газамі, далі тыя ж вынікі.

Вывучаючы на доследзе залежнасць ціску газу ад яго аб'ёму, англійскі вучоны Бойль (1627—1691) і французскі вучоны Марыёт (1620—1684), незалежна адзін ад другога, адкрылі наступны закон:

Ціск дадзенай масы газу пры нязменнай тэмпературы адваротна прапарцыянальны аб'ёму газу.

Гэты закон называецца законам Бойля—Марыёта.

Выразім закон Бойля—Марыёта матэматычна. Няхай тэмпература некаторай масы газу пастаянная і няхай:

V_1 —аб'ём газу пры ціску p_1 ,

V_2 — » » » » p_2 .

Згодна з законам Бойля—Марыёта, можна напісаць:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{p_2}{p_1}.$$

З гэтай формулы вынікае, што:

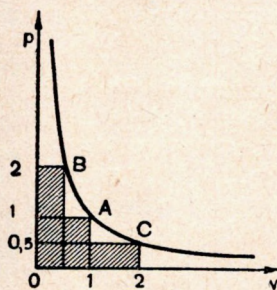
$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Атрыманую роўнасць можна разглядаць як новае выражэнне закону Бойля—Марыёта:

Здабытак аб'ёму дадзенай масы газу на яго ціск пры нязменнай тэмпературы ёсць велічыня пастаянная.

Пакажам графічна ізатэрмічнае змяненне стану газу. Для гэтага па восі абсцыс будзем адкладваць значэнні аб'ёмаў газу, а па восі ардынаты адпаведныя ім значэнні ціску. Выберам маштаб так, каб пачатковыя значэнні аб'ёму і ціску былі роўны 1. Тады пачатковы стан газу будзе паказан пунктам А (рыс. 135). Калі ціск павялічыцца ўдвая, аб'ём паменшыцца ў два разы, стан газу выразіцца на графіку пунктам В. Пры памяншэнні першапачатковага ціску ўдвая аб'ём падвоіцца, атрымаем пункт С. Калі браць далей ціскі ў тры, чатыры і г. д. разоў большыя або меншыя пачатковага, а аб'ёмы адпаведна ў тры, чатыры і г. д. разоў меншыя або большыя, атрымаем рад пунктаў, якія паказваюць розныя станы адной і той жа масы газу пры аднолькавай тэмпературы. Правёўшы праз гэтыя пункты лінію, атрымаем крывую, якая называецца *ізатэрмай*.

Стараннымі даследаваннямі вызначана, што для рэальна існуючых газаў закон Бойля—Марыёта мае толькі набліжанае значэнне.



Рыс. 135. Графік ізатэрмічнага працэсу.

Так, напрыклад, калі здабытак pV пры 1 ат ровен адзінцы, то пры 2 ат ён мае наступныя значэнні:

для паветра	0,99977
» вадароду	1,00026
» вокісу вугляроду	0,99974
» двухвокісу вугляроду	0,99720

Пры вельмі вялікіх цісках (у сотні і тысячы атмасфер) закон Бойля—Марыёта становіцца зусім непрымнімим; у такіх выпадках залежнасць паміж аб'ёмам і ціскам газу выражаецца больш складанымі ўраўненнямі.

Практыкаванне 21.

1. Пры ціску ў 1 ат газ займае аб'ём у 10 л . Якім будзе аб'ём гэтага газу пры ціску ў 5 ат ? Тэмпература ў абодвух выпадках аднолькавая.

2. У газавым балоне ёмкасцю ў 10 л знаходзіцца газ пад ціскам у 20 ат . Які аб'ём зойме гэты газ, калі не змяняючы тэмпературы, адкрыць гентыль балона?

3. Два балоны злучаны трубкай з кранам. У адным балоне ёмкасцю ў 5 л знаходзіцца паветра пад ціскам у 3 ат , другі балон ёмкасцю ў 1 л пусты. Які ціск устанавіцца ў кожным з балонаў, калі адкрыць кран (аб'ём трубкай з кранам пад увагу не прымаць)? Тэмпература ў час доследу пастаянная.

4. У футбольны мяч ёмкасцю ў $2,5 \text{ л}$ накачваюць паветра ручным насосам, забіраючы пры кожным узмаху 125 см^3 паветра пры атмасферным ціску. Якім будзе аб'ём унутры мяча, калі зроблена ўсяго 40 узмахаў і мяч перад накачваннем быў пусты? Тэмпературу лічыць пастаяннай.

5. Паветраны шар падняўся пры ціску ў 760 мм рт. сл. у слой паветра, дзе ціск быў ровен 500 мм рт. сл. У колькі разоў павялічыцца аб'ём газу, які напаўняе шар? Шар зроблен з эластычнай гумавай плёнкі. Тэмпературу лічыць пастаяннай.

6. Пабудаваць ізатэрму $pV = 8 \text{ ат} \cdot \text{см}^3$, узяўшы маштабам на паперы ў клетку для адзінак ціску і аб'ёму адну клетку.

85. Залежнасць паміж шчыльнасцю газу і яго ціскам. Шчыльнасць газу лікава роўна масе, змешчанай у адзінцы аб'ёму.

Маса газу не мяняецца пры яго сцісканні або расшырэнні, але аб'ём мяняецца; значыць, мяняецца і шчыльнасць газу.

Няхай пры пастаяннай тэмпературы: D_1 —шчыльнасць газу пры аб'ёме V_1 і ціску p_1 , а D_2 —шчыльнасць газу пры аб'ёме V_2 і ціску p_2 .

Калі маса газу роўна m , то можна напісаць:

$$D_1 = \frac{m}{V_1}; \quad D_2 = \frac{m}{V_2},$$

адкуль:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Але $\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2}$ — на падставе закону Бойля—Марыёта; таму

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{p_1}{p_2}.$$

Пры пастаяннай тэмпературы шчыльнасць газу прама прапарцыянальна яго ціску.

Няцяжка зразумець справядлівасць гэтага вываду, зыходзячы з малекулярна-кінетычнай тэорыі. На самай справе, ціск газу абумоўлен ударамі яго малекул. Калі аб'ём газу паменшыцца ў два разы, то ў новым аб'ёме шчыльнасць газу стане ў два разы большай. У два разы павялічыцца і лік удараў малекул аб сценкі, г. зн. ціск газу ўзрасце ў два разы.

Практыкаванне 22.

1. Як змяняецца аб'ём пазурка паветра, калі гэты пазурок падываецца з дна вадаёма на паверхню?

2. Чаму пад'ём на высокую гару часта звязан з болем і крывяцёкам з вушэй і носа?

3. 100 м³ вадароду, які знаходзіцца пры нармальным ціску, нагнятаюць у сталёны балон ёмкасцю ў 5 м³. Знайсці ціск у балоне ў $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$.

4. У аўтамабільную шыну ёмкасцю ў 25 000 см³ накачалі паветра да ціску ў 8 $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$. Знайсці шчыльнасць і вагу паветра ўнутры шыны, калі шчыльнасць паветра пры ціску 760 мм рт. сл. роўна 0,00129 $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

5. У апушчаным у вадз вадалазным каўпаку ўзровень вады на 1033 см ніжэй паверхні вады. Знайсці шчыльнасць паветра ў каўпаку, лічачы працэс сціскання паветра ізатэрмічным, а шчыльнасць паветра над паверхняй вады 0,00129 $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

86. Залежнасць аб'ёму газу ад тэмпературы. Закон Гей-Люсака. Як і ўсе целы, газы пры нагрэванні расшыраюцца, прычым вельмі

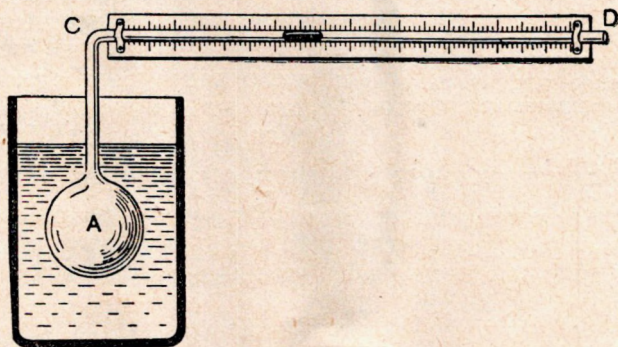


Рис. 136. Устаноўка для назірання расшырэння газу пры нагрэванні.

прыкметна нават пры нязначным нагрэванні. Гэта лёгка выявіць на наступным простым доследзе (рис. 136).

Колба *A* злучаецца з размешчанай гарызантальна трубкай *CD*, якая замацавана ўздоўж шкалы. Унутры гэтай трубкі знаходзіцца невялікі слупок ртуці. Дастаткова да колбы дакрануцца рукой, як слупок ртуці ў трубцы *CD* пачне рухацца.

Пры ахаладжэнні колбы слупок ртуці перамяшчаецца ўлева, а пры нагрэванні — управа; значыць, газ пры ахаладжэнні сціскаецца.

а пры награванні расшыраецца. Ведаючы аб'ём колбы і дыяметр трубка, можна не толькі пазіраць расшырэнне газу, але і вымераць павелічэнне аб'ёму газу.

Паступова награвваючы газ у колбе, можна ўстанавіць, што пры пастаянным ціску змяненне аб'ёму дадзенай масы газу пра-



Гей-Люсак Жазеф Луі (1778—1850)—адзін з выдатных французскіх хімікаў і фізікаў. Ён адкрыў рад важных хімічных і фізічных законаў, з якіх у фізіцы шырока вядом закон аднолькавага расшырэння газаў і пары пры аднолькавым павышэнні тэмпературы.

парцыянальна змяненню тэмпературы. Таму цэлавое расшырэнне газу, таксама як і іншых цел, можна ахааратарызаваць пры дапамозе каэфіцыента аб'ёмнага расшырэння.

Няхай пры тэмпературы 0°C аб'ём газу ровен V_0 , а пры тэмпературы t аб'ём V_t . Павелічэнне аб'ёму, якое прыпадае на кожную адзінку аб'ёму, узятага пры 0°C , пры награванні на 1° будзе роўна:

$$\alpha = \frac{V_t - V_0}{V_0 t},$$

адкуль:

$$V_t = V_0 (1 + \alpha t). \quad (1)$$

Велічыня α , якая ўваходзіць у напісаныя вышэй формулы, называецца каэфіцыентам аб'ёмнага расшырэння газу.

Французскі вучоны Гей-Люсак, правяраючы на доследзе цэлавое расшырэнне газаў, адкрыў, што **каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння ва ўсіх газаў**

пры пастаянным ціску аднолькавы і лікава ровен $\frac{1}{273}$.

У гэтых адносінах расшырэнне газаў пры награванні адрозніваецца ад расшырэння цвёрдых і вадкіх цел, дзе, як мы бачылі (гл. § 81 і 82), каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння залежыць ад хімічнага саставу цел.

Няхай у формуле (1): $t = 1^{\circ}$, $\alpha = \frac{1}{273}$.

Мы атрымаем:

$$V_t = V_0 + \frac{1}{273} V_0.$$

адкуль вынікае, што **пры награванні на 1° пад пастаянным ціскам аб'ём дадзенай масы газу павялічваецца на $\frac{1}{273}$ таго аб'ёму, які газ займаў пры 0°C .**

Гэты закон атрымаў назву закону Гей-Люсака.

Працэсы, падобныя да разгледжанага, якія працякаюць пры пастаянным ціску, называюцца **ізабарычнымі**¹.

¹ Ад грэч. слоў: іза—роўны, бара—цяжар, вага.

Формула (1) показує, що об'єм газу при температурі t° рівен здабытку яго аб'ёму, узятага пры 0°C , на біном аб'ёмнага расшырэння $(1 + \alpha t)$.

Прыклад 1. Аб'ём некаторай масы газу пры 0°C рівен 10 л. Знайсці аб'ём яго пры $t = 273^\circ\text{C}$, калі ціск пастаянны.

Па ўмовах задачы нам вядом аб'ём газу пры 0°C , г. зн. $V_0 = 10$ л; падстаўляючы лікавыя даныя задачы ў формулу $V_t = V_0(1 + \alpha t)$, знойдзем, што

$$V_t = 10 \left(1 + \frac{273}{273} \right) \text{ л} = 20 \text{ л}.$$

Прыклад 2. Пры температурі 273°C аб'ём некаторай масы газу рівен 10 л. Чаму будзе рівен аб'ём гэтага газу пры температурі 546°C , калі ціск пастаянны?

Нам вядом аб'ём газу пры температурі 273°C ; каб вызначыць аб'ём гэтага газу пры $t_2 = 546^\circ\text{C}$, трэба папярэдне знайсці яго аб'ём пры 0° .

Гэты аб'ём знойдзецца з роўнасці:

$$10 \text{ л} = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 273 \right) \text{ л},$$

адкуль:

$$V_0 = \frac{10 \text{ л}}{2} = 5 \text{ л}.$$

Знойдзем цяпер аб'ём газу пры 546° :

$$V_t = 5 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 546 \right) \text{ л} = 15 \text{ л}.$$

Практыкаванне 23.

1. Які аб'ём зойме вадарод пры 100° , калі пры 0° ён займае аб'ём у 5 л? Ціск не змяняецца.

2. Вуглякіслы газ пры температурі 30° займае аб'ём 720 см³. Якім будзе аб'ём гэтага газу пры тым жа ціску і температурі 0°C ?

3. Да якой температурі трэба нагрэць газ, узяты пры 0° і пастаянным ціску, каб яго аб'ём павялічыўся ў два разы?

4. Аб'ём паветра пры температурі 27°C рівен 100 л. Якім будзе аб'ём яго пры температурі 54°C ? Ціск пастаянны.

5. Паказаць графічна працэс змянення аб'ёму газу пры награванні які выражаецца ўраўненнем: $V_t = V_0(1 + \alpha t)$ пры $p = \text{const}$.

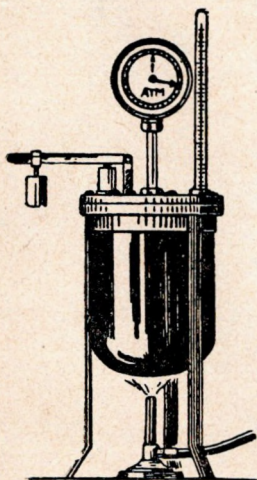
87. Залежнасць ціску газу ад температурі. Закон Шарля. Награвуючы газ у закрытым цыліндры, напрыклад у папінавым катле (рыс. 136а), можна па манометру заўважыць, што ціск газу павялічваецца. Назіраючы па тэрмометру за павышэннем температурі, лёгка ўстанавіць, што пры пастаянным аб'ёме ціск газу ўзрастае прапарцыянальна павышэнню температурі.

Аналагічна таму, як для характарыстыкі цеплага расшырэння газаў мы ўвялі каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння, увядзём велічыню, якая характарызуе змяненне ціску газу пры змяненні яго температурі.

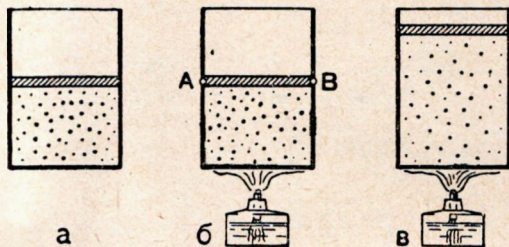
Абазначым літарай p_0 ціск газу пры 0°C , а p_t —ціск пры t° . Павелічэнне ціску, якое прыпадае на кожную адзінку пачатковага ціску пры нагрavanні на 1°C , будзе роўна:

$$\gamma = \frac{p_t - p_0}{p_0 t}. \quad (1)$$

Велічыня γ (грэч. «гама») называецца тэрмічным каэфіцыентам ціску газу.



Рыс. 136а. Пры нагрavanні газу ў закрытым цыліндры ціск яго павышаецца.



Рыс. 137: а) пачатковы стан газу: 0° , V_0 , p_0 ; б) стан газу, вызначаемы велічынямі:

$$t^\circ, V_0, p_t = p_0(1 + \gamma t);$$

в) стан газу, вызначаемы велічынямі:

$$t^\circ, V_t = V_0(1 + \alpha t), p_0.$$

Вымярэнні паказваюць, што **велічыня тэрмічнага каэфіцыента ціску для ўсіх газаў аднолькавая і роўна $\frac{1}{273}$** .

Вызначаючы з формулы (1) велічыню p_t , атрымаем:

$$p_t = p_0(1 + \gamma t). \quad (2)$$

Няхай у формуле (2) $\gamma = \frac{1}{273}$, $t = 1^\circ$; тады $p_t = p_0 + \frac{1}{273} p_0$.

Адсюль вынікае, што **ціск дадзенай масы газу пры нагрavanні на 1° пры пастаянным аб'ёме павялічваецца на $\frac{1}{273}$ таго ціску, які меў газ пры 0°C** .

Гэты закон называецца законам Шарля, па імені французскага вучонага, які адкрыў яго ў 1787 г.

З закону Шарля вынікае, што тэрмічны каэфіцыент ціску газу γ ровен каэфіцыенту аб'ёмнага расшырэння α . Гэтая роўнасць вынікае з закону Бойля—Марыёта. Дакажам гэта.

Няхай некаторая маса газу заключана ў цыліндры пад поршнем (рыс. 137, а) і няхай тэмпература яе ў гэтым пачатковым стане роўна 0° , аб'ём V_0 і ціск p_0 . Замацуем поршань АВ і нагрэем газ да тэмпературы t° (рыс. 137, б); тады ціск газу павялічыцца і стане роўным p_t , аб'ём жа яго застанеца ранейшым.

Па закону Шарля: $p_t = p_0(1 + \gamma t)$.

Будзем цяпер газ награвать ад 0° да t° (рыс. 137, в), даўшы поршню свабодна перамяшчацца. Ціск газу застанецца такім жа, якім быў у пачатковым яго стане, г. зн. p_0 , аб'ём жа павялічыцца да V_t . Па закону Гей-Люсака:

$$V_t = V_0(1 + \alpha t).$$

Такім чынам, маем: пры тэмпературы t° аб'ём дадзенай масы газу V_0 і ціск $p_t = p_0(1 + \gamma t)$; пры той жа тэмпературы: ціск p_0 і аб'ём $V_t = V_0(1 + \alpha t)$. Па закону Бойля — Марыёта:

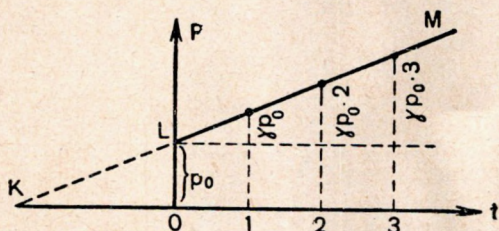
$$p_0 V_0(1 + \gamma t) = p_0 V_0(1 + \alpha t).$$

Пасля спрашчэння гэтага выражэння атрымліваем роўнасць:

$$\alpha = \gamma.$$

Выразім спачатку ў выглядзе табліцы, а затым графічна залежнасць ціску газу ад тэмпературы. Для гэтага скарыстаем ураўненне:

$$p_t = p_0(1 + \gamma t), \text{ або } p_t = p_0 + \gamma p_0 t.$$



Рыс. 138. Графік змянення ціску газу ад тэмпературы.

t	p_t
0	p_0
1	$p_0 + \gamma p_0 \cdot 1$
2	$p_0 + \gamma p_0 \cdot 2$
3	$p_0 + \gamma p_0 \cdot 3$
...	
t	$p_0 + \gamma p_0 \cdot t$

Адкладзём па восі абсцыс у некаторым умоўным маштабе тэмпературы газу, а па восі ардынат адпавядаючыя гэтым тэмпературам ціскі, узятыя з напісанай вышэй табліцы.

Злучаючы на графіку адзначаныя пункты, атрымаем прамую LM (рыс. 138), якая з'яўляецца графікам залежнасці ціску газу ад тэмпературы пры пастаянным аб'ёме.

Працэс змянення стану газу, які адбываецца пры нязменным аб'ёме газу, называецца *ізахорным*¹ працэсам, а лінія LM , якая паказвае змяненне ціску газу пры пастаянным аб'ёме ў залежнасці ад тэмпературы, называецца *ізахорай*.

Прывядзём цяпер рашэнні прыкладаў на закон Шарля.

Прыклад 1. Ціск газу пры 0°C роўн 780 мм рт. сл. Вызначыць ціск гэтага газу пры тэмпературы 273°C .

Па формуле $p_t = p_0(1 + \gamma t)$ знойдзем, што

$$p_t = 780 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 273 \right) = 1560 \text{ мм рт. сл.} \approx 2 \text{ ат.}$$

Прыклад 2. Чаму будзе роўн ціск газу пры тэмпературы 546° , калі ціск яго пры тэмпературы 273° роўн 780 мм рт. сл.?

¹ Ад грэч. слоў: *іза*—роўны, *хорэма*—умяшчальнасць.

У гэтай задачы перш за ўсё трэба вызначыць ціск газаў пры 0°C . Па формуле $p_t = p_0(1 + \gamma t)$ знаходзім:

$$p_0 = \frac{P_t}{1 + \gamma t} = \frac{780}{1 + \frac{1}{273} \cdot 273} = 390 \text{ мм рт. сл.}$$

Цяпер можна вызначыць ціск газу пры $t = 546^{\circ}$:

$$p_t = 390 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot 546 \right) = 1170 \text{ мм рт. сл.}$$

Законы Гей-Люсака і Шарля таксама, як і закон Бойля — Марыёта, толькі набліжана адлюстроўваюць уласцівасці газаў. Гэта можна бачыць хаця б з таго факту, што для розных газаў велічыні α і γ крыху адрозніваюцца паміж сабою (гл. табліцу).

Газ пры 0°C , 760 мм рт. сл.	α	γ
Вадарод	0,0036600	0,0036613
Гелій	0,0035820	0,0036601
Азот	0,0036732	0,0036744
Духовік вугляроду . .	0,0037414	0,0037262
Паветра	0,0036760	0,0036750

Дакладныя вымярэнні паказваюць, што для кожнага дадзенага газу значэнні α і γ атрымліваюцца розныя ў залежнасці ад таго, у якім тэмпературным інтэрвале і пры якім ціску яны вызначаны. Аднак гэтыя адрозненні вельмі нязначныя, яны ўлічваюцца толькі пры зусім дакладных разліках.

Практыкаванне 24.

1. Пабудаваць ізахору газу, які награваяецца ад 0°C да 100°C , калі пры 0°C ціск газу ровен 500 мм рт. сл.
2. Чаму ровен ціск вадароду пры 30°C , калі пры 0°C яго ціск 700 мм рт. сл.? Аб'ём газу заставаўся пастаянным.
3. Дзве колбы ў 200 см^3 і ў 1 л , якія змяшчаюць пры 0°C паветра пры нармальным атмасферным ціску, закупораны і награвваюцца ў пары кіпячай вады. Ці будуць у гэтых колбах ціскі розныя або аднолькавыя?

88. Абсалютная шкала тэмператур. Вернемся яшчэ раз да графіка змянення ціску газу з тэмпературай (рыс. 138).

Прадоўжым прамую LM на гэтым графіку да перасячэння яе з гарызантальнай воссю, на якой адкладваюцца тэмпературы газу; яна перасячэ гэтую вось у пункце K . Адрэзак OK будзе паказваць на гэтым графіку такую тэмпературу газу, пры якой ціск яго ровен нулю. Чаму роўна гэтая тэмпература?

Звернемся да ўраўнення $p_t = p_0(1 + \gamma t)$. Дапусцім у гэтым ураўненні $p_t = 0$, г. зн. напішам наступную роўнасць:

$$0 = p_0(1 + \gamma t).$$

Паколькі ціск газу пры 0°C не ровен нулю ($p_0 \neq 0$), то з напісанай роўнасці вынікае, што:

$$1 + \gamma t = 0,$$

$$\text{адкуль: } t = -\frac{1}{\gamma}, \text{ або, паколькі } \gamma = \frac{1}{273}, \text{ то}$$

$$t = -273^{\circ}.$$

Такім чынам, ціск газу ровен нулю пры тэмпературы -273°C .

Англіійскі вучоны Вільям Томсан (Кельвін) прапанаваў такую шкалу тэмператур, пры якой за нуль градусаў узята тэмпература -273° . Гэтая шкала атрымала назву абсалютнай шкалы тэмператур, або шкалы Кельвіна, а нуль градусаў гэтай шкалы, роўны -273° , называецца абсалютным нулём тэмператур.

У шкале Кельвіна велічыня градуса такая ж, як і ў стоградуснай шкале Цэльсія.

Будзем абазначаць тэмпературу па шкале Кельвіна літарай T .

Пры нармальным атмасферным ціску тэмпература раставання лёду па шкале Кельвіна $T_0 = 273^{\circ}$, тэмпература ж кіпення вады $T = 373^{\circ}$.

Усякая іншая тэмпература t стоградуснай шкалы Цэльсія звязана з абсалютнай тэмпературай T суадносінамі:

$$T = t^{\circ} + 273^{\circ};$$

$$t^{\circ} = T - 273^{\circ}.$$



Практыкаванне 25.

1. Перавядзіце на шкалу абсалютных тэмператур наступныя тэмпературы па шкале Цэльсія: 20° ; -14° ; -260° ; 125° .

2. Перавядзіце на шкалу Цэльсія наступныя тэмпературы па шкале Кельвіна: 15° ; 124° ; 273° ; 373° ; 1150° .

Томсан (Кельвін) Вільям (1824—1907) — выдатны англіійскі фізік. Яму належаць важныя адкрыцці ў галіне тэорыі электрычнасці і цеплыні і вынаходствы, з якіх найбольш значным было ўдасканаленне тэлеграфнай сувязі. Ён увёў у фізіку паняцце аб абсалютнай тэмпературы. Яго імем названы градусы шкалы абсалютных тэмператур — *градусы Кельвіна*.

89. Залежнасць паміж аб'ёмам, ціскам і тэмпературай газу. Аб'яднаны закон газавага стану. Мы разгледзелі працэсы, у якіх адна з трох велічынь, што характарызуюць стан газу (аб'ём, ціск і тэмпература), не мяняецца.

Мы бачылі, што калі не мяняецца тэмпература, то ціск і аб'ём газу звязаны адзін з другім законам Бойля—Марыёта. Пры пастаянным ціску аб'ём газу змяняецца са змяненнем тэмпературы па закону Гей-Люсака, і, нарэшце, пры пастаянным аб'ёме ціск газу змяняецца са змяненнем тэмпературы па закону Шарля.

Аднак у прыродзе часта маюць месца працэсы, калі адначасова

мянююца ўсе тры велічыні, якія характарызуюць стан газу. Установім цяпер, якая сувязь існуе паміж аб'ёмам, ціскам і тэмпературай.

Няхай для двух якіх-небудзь адвольных станаў некаторай масы газу гэтыя велічыні будуць:

$$1) V_1, p_1, t_1; 2) V_2, p_2, t_2.$$

З гэтых станаў змяненнем велічынь p , V або t газ можна перавесці ў любыя іншыя станы. Будзем, напрыклад, захоўваючы пастаянным ціск, пераводзіць газ са станаў 1) і 2) у станы, пры якіх тэмпература газу будзе роўна 0°C .

Па закону Гей-Люсака аб'ём газу V_1 пасля памяншэння тэмпературы ад t_1° да 0° будзе роўны $\frac{V_1}{1+\alpha t_1}$, а аб'ём V_2 пасля памяншэння тэмпературы ад t_2° да 0° будзе $\frac{V_2}{1+\alpha t_2}$. Новыя станы газу будуць выражаны так:

$$1') \frac{V_1}{1+\alpha t_1}, p_1, 0^\circ; 2') \frac{V_2}{1+\alpha t_2}, p_2, 0^\circ.$$

У абодвух гэтых становішчах тэмпература газу аднолькавая, таму на аснове закону Бойля—Марыёта можна напісаць:

$$\frac{V_1}{1+\alpha t_1} p_1 = \frac{V_2}{1+\alpha t_2} p_2. \quad (1)$$

Паколькі велічыні p , V , t , якія характарызуюць стан разглядаемага газу і абазначаны індэксамі 1 і 2, выбраны былі намі адвольна, то роўнасць (1) справядлівая для любых станаў гэтага газу. Таму можна сцвярджаць, што:

$$\frac{pV}{1+\alpha t} = \text{const}. \quad (2)$$

Для дадзенай масы газу здабытак ціску газу на яго аб'ём, падзелены на біном аб'ёмнага расшырэння, ёсць велічыня пастаянная.

Выведзеная намі залежнасць паміж аб'ёмам, ціскам і тэмпературай газу называецца аб'яднаным законам газавага стану, а роўнасць (1) або (2)—ураўненнем стану газу.

Ураўненне стану газу можна спрасіць, увёўшы ў яго замест тэмпературы t па шкале Цэльсія тэмпературу T па абсалютнай шкале тэмператур. Для гэтага пераўтварым ураўненне:

$$\frac{p_1 V_1}{1+\alpha t_1} = \frac{p_2 V_2}{1+\alpha t_2}.$$

Увёўшы ў яго значэнне $\alpha = \frac{1}{273}$, атрымаем:

$$\frac{p_1 V_1}{273+t_1} = \frac{p_2 V_2}{273+t_2}.$$

што пасля скарачэння на 273 дасць:

$$\frac{p_1 V_1}{273 + t_1} = \frac{p_2 V_2}{273 + t_2}.$$

Але $273 + t_1 = T_1$ і $273 + t_2 = T_2$; значыць, можна напісаць:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

Гэта азначае, што **для дадзенай масы газу здабытак ціску на аб'ём, падзелены на абсалютную тэмпературу, пастаянны пры ўсіх тэмпературах:** $\frac{pV}{T} = \text{const.}$

У прыватнасці, калі пры тэмпературы $T = 273^\circ$ аб'ём газу ровен V_0 і ціск яго p_0 , то можна напісаць:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{273}.$$

90. Фізічная сутнасць паняцця абсалютнага нуля. Мы ўжо адзначалі, што рэальныя газы толькі набліжана адпавядаюць законам Гей-Люсака, Шарля і Бойля—Марыёта. Аднак можна ўявіць сабе газ, для якога гэтыя законы выконваліся б у дакладнасці. Малекулы такога газу могуць быць прадстаўлены ў выглядзе пругкіх шарыкаў знікальна малога аб'ёму, узаемадзеянне паміж якімі ажыццяўляецца толькі праз іх сутыкненні аднаго з другім. У фізіцы такі газ прынята называць ідэальным газам.

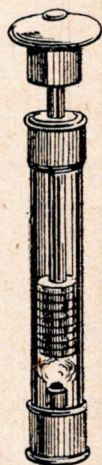
З ураўнення $p_t = p_0 (1 + \alpha_t)$ вынікае, што пры $t = -273^\circ$, г. зн. пры абсалютным нулі, ціск газу ровен нулю. Але ціск газу ёсць вынік удараў рухаючыхся малекул аб сценкі сасуда. Значыць, пры тэмпературы абсалютнага нуля павінен спыніцца цеплавы рух малекул ідэальнага газу.

Дослед паказвае, што пры малых цісках уласцівасці рэальных газаў вельмі блізкія да ўласцівасцей ідэальнага газу. Значыць, пры набліжэнні да тэмпературы абсалютнага нуля павінен спыніцца цеплавы рух малекул і рэальнага газу. Гэты вывад адносіцца не толькі да газаў, але і да цвёрдых і вадкіх цел.

Фізікай устаноўлена, што такі стан рэчыва недасягальны, але да яго можна падыйсці вельмі блізка. У наш час дасягнута тэмпература, якая вышэй за абсалютны нуль усяго на $0,0044^\circ$.

91. Змяненне тэмпературы газу пры хуткім расшырэнні і сцісканні. Доследы паказваюць, што пры хуткім сцісканні тэмпература газу павышаецца, а пры хуткім расшырэнні—паніжаецца.

Павелічэнне тэмпературы газу пры сцісканні можна паказаць на наступным простым доследзе. Возьмем таўстасценны цыліндрычны шкляны сасуд, унутры якога можа рухацца поршань (рыс. 139).



Рыс. 139.
Пры хуткім сцісканні паветра ў цыліндры моцна нагрываецца, і лёгкае на загаранне рэчыва ўспыхвае.

Пры хуткім сцісканні паветра ў сасудзе моцна награваетца, і лёгкае на загаранне рэчыва (напрыклад, ватка, змочаная эфірам), пакладзенае на дно сасуда, успыхае.

Такога роду з'ява выкарыстоўваецца, напрыклад, у рухавіках унутранага згарання—дызелях: пры сцісканні паветра ў цыліндры рухавіка гаручая сумесь, уведзеная ў цыліндр, награваетца да тэмпературы ўспалымнення (работы рухавіка апісаны ў § 131).

Пры хуткім жа расшырэнні газу тэмпература яго паніжаецца. Гэта можна назіраць на наступным доследзе. Будзем накачваць паветра ў трывалы, закрыты коркам шкляны слоік, які змяшчае пару вады. Пры дасягненні пэўнага ціску корак выскачыць; пры гэтым паветра, расшыраючыся, выканае работу і ахалодзіцца, з прычыны чаго вадзяная пара ператворыцца ў туман (рыс. 140).

Паніжэнне тэмпературы пры хуткім расшырэнні газу выкарыстоўваецца для атрымання звадкаваных газаў; аб гэтым будзе выкладзена ў § 122.

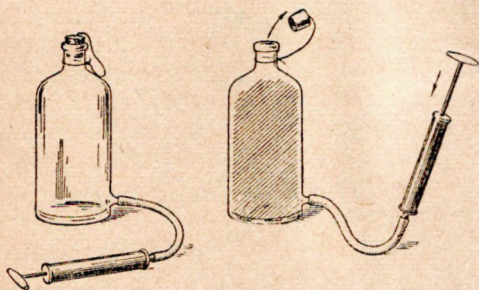


Рис. 140. Сціснутае ў сасудзе паветра, выкідаючы корак, расшыраецца. Выконваючы пры гэтым работу, яго ахалоджаецца, у выніку чаго вадзяная пара ў сасудзе ператвараецца ў туман.

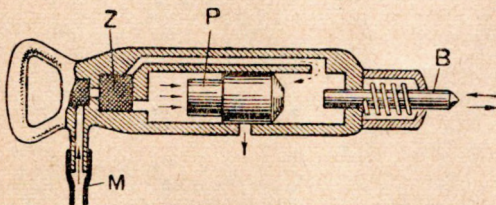


Рис. 141. Схема будовы адбойнага малатка.

Змяненне тэмпературы цела, як было ўстаноўлена ў § 71, звязана са змяненнем унутранай энергіі цела. Паколькі пры хуткім сцісканні тэмпература газу павышаецца, то ўнутраная энергія яго пры гэтым павялічваецца. Павелічэнне ўнутранай энергіі газу адбываецца ў выніку работы, выкананай пры яго сцісканні. Расшыраючыся ж, газ выконвае работу; пры гэтым унутраная энергія яго памяншаецца, і калі расшырэнне адбываецца хутка, то тэмпература газу, як мы бачылі ў нашых доследах, паніжаецца.

Працэс, які адбываецца ў цэле без цеплаабмену з акружачымі яго іншымі цэламі, называецца адыябатным працэсам.

Усе хутка працякаючыя працэсы практычна могуць лічыцца адыябатнымі.

92. Прыманенне сціснутых газаў. Многія сціснутыя газы ў цяперашні час знаходзяць шырокае прыманенне ў тэхніцы.

Сціснутае паветра, напрыклад, прыманяецца ў рабоце розных пнеўматычных інструментаў: адбойных малаткоў, заклёпачных малаткоў, у распырсквальнікаў фарбы і інш.

На рис. 141 показана схема будовы адбойнага малатка. Сціснутае паветра падаецца ў малаток па шлангу *М*. Залатнікі *З*, аналагічныя прымяняемым у паравых машынах, накіроўваюць яго па чарзе то ў заднюю, то ў пераднюю частку цыліндра. Таму паветра цісне на поршань *Р* то з аднаго, то з другога боку, што выклікае хуткі зваротна-паступальны рух поршня і пікі малатка *В*. Апошняя хутка наносіць адзін за другім удары, укараняецца ў вугаль і адколае кавалкі яго ад масіву.

Існуюць таксама пескаструменныя апараты, якія даюць моцны струмень паветра, змешаны з пяском. Гэтыя апараты прымяняюцца, напрыклад, для ачысткі сцен. Цяпер нярэдка можна бачыць работу спецыяльных апаратаў, якія прымяняюцца для афарбоўкі сцен, дзе фарба распырскваецца сціснутым паветрам. Сціснутым паветрам адчыняюцца дзверы вагонаў метро і тралейбусаў. Сціснутае паветра выкарыстоўваецца ў рабоце тармазоў на транспарце. Схематычная будова аднаго з відаў пнеўматычнага тармаза чыгуначнага вагона паказана на рис. 142.

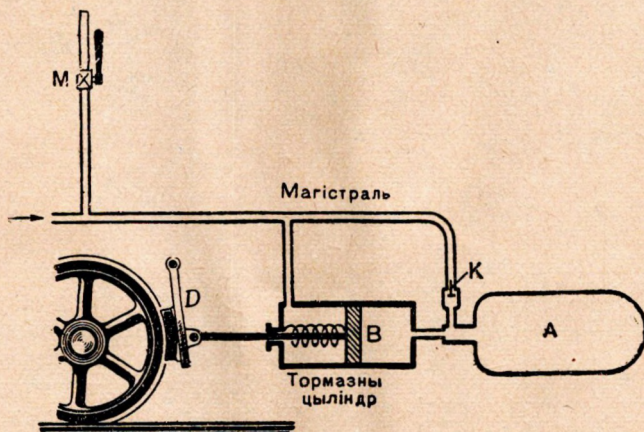


Рис. 142. Схема будовы чыгуначнага пнеўматычнага тармаза.

Кампрэсар падае паветра па магістралі ў стальны рэзервуар *А*. Поршань *В* тармазнага цыліндра аказваецца пад аднолькавым ціскам справа і злева; таму злучаная з ім тармазная калодка *Д* адціснута ад кола. Калі адкрыць тармазны кран *М*, то паветра, якое знаходзіцца ў магістралі пад ціскам, накіроўваецца ў атмасферу; пры гэтым захлопнецца клапан *К* і, такім чынам, стальны рэзервуар ізалюецца ад магістралі. Ціск на поршань *В* справа будзе большым, чым ціск злева, з прычыны чаго тармазная калодка прыціснецца да вобода кола. Калі цяпер кран *М* закрыць і зноў падаць сціснутае паветра па магістралі, то адновіцца першапачатковае становішча.

У тэхніцы прымяняецца не толькі сціснутае паветра, але і некаторыя іншыя газы; так, напрыклад, вадарод, ацэтылен і кісларод прымяняюцца пры газавай зварцы; аміяк прымяняецца ў халадзіль-

най справе. Каб газы было зручна перавозіць, іх змяшчаюць у тры-валыя стальныя балоны, накачваючы да ціску 60—200 ат.

Сцісканне газаў ажыццяўляецца з дапамогай магутных нагня-тальных насосаў—кампрэсараў.

На рис. 143, а, б дадзена схема работы кампрэсара.

Кампрэсар складаецца з цыліндра з поршнем і двума клапанамі; адзін з іх—уваходны, другі—выходны. Пры руху поршня ўніз

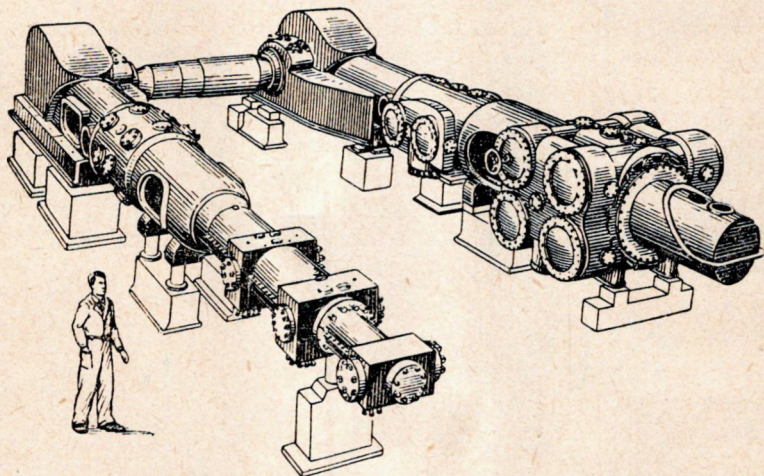


Рис. 143. Знадворны выгляд магутнага кампрэсара.

(рис. 143, б) адкрываецца ўваходны клапан і ў цыліндр паступае паветра з памяшкання; пры руху поршня ўверх (рис. 143, а) уваходны клапан закрываецца, увайшоўшае паветра сціскаецца поршнем і праз выходны клапан паступае ў стальны балон для захавання сціснутага газу.

Існуюць так званыя шматступеньчатыя кампрэсары, у якіх газ пасля-доўна сціскаецца ў трох або чатырох цыліндрах. Такія кампрэсары дазва-ляюць атрымаць сціснуты газ да ціску ў тысячы атмасфер. На рис. 143 паказан знадворны выгляд аднаго з тыпаў шматступеньчатых кампрэсараў.

Практыкаванне 26.

1. Карыстаючыся ўраўненнем стану газу

$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$, атрымаць з яго матэматыч-ныя выражэнні для закону Бойля—Марыёта, закону Гей-Люсака і закону Шарля.

2. Пры 0°C і ціску 760 мм паветра займае аб'ём 5 л. Які будзе аб'ём паветра пры ціску ў 800 мм і тэмпературы 20°C?

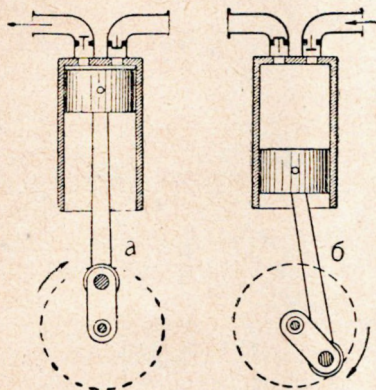


Рис. 143. а, б. Схема работы кампрэсара.

3. При ціску ў 1 ат і тэмпературы 15°C паветра мае аб'ём 2 л . При якім ціску паветра зойме аб'ём 4 л , калі тэмпература яго стане 20°C ?

4. Аб'ём вадароду пры тэмпературы 50° і ціску 750 мм ровен $2,5 \text{ л}$. Які аб'ём той жа масы вадароду пры тэмпературы 0° і ціску 760 мм ?

5. Да якой тэмпературы нагрэецца газавая сумесь у рухавіку ўнутранага згарання, калі яна ў цыліндры пад атмасферным ціскам пры тэмпературы 50° запаўняе аб'ём 40 дм^3 , а пры руху поршня сціскаецца да аб'ёму ў 5 дм^3 пры ціску 15 ат ?

6. Калі шчыльнасць газу пры тэмпературы 0°C і ціску p_0 роўна D_0 , то якая будзе шчыльнасць газу D_t пры тэмпературы $t^\circ\text{C}$ і ціску p ?

7. Начарціць графік залежнасці ціску газу ад абсалютнай тэмпературы пры пастаянным аб'ёме. Параўнаць яго з графікам, які выражаецца ўраўненнем $p_t = p_0 (1 + \gamma t)$ (рыс. 138).

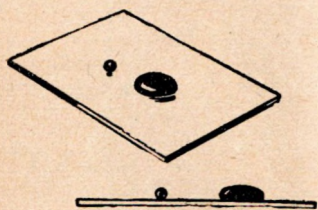
РАЗДЕЛ IX.

УЛАСЦІВАСЦІ ВАДКАСЦЕЙ.

93. Малекулярны рух у вадкасцях. У вадкасцях малекулы размешчаны значна бліжэй адна ад другой, чым у газах. Такі вывад можна зрабіць на падставе таго, што шчыльнасць вады, напрыклад, пры нармальным ціску і тэмпературы кіпення амаль у 1670 разоў большая, чым шчыльнасць яе пары. Таму характар руху малекул вадкасці і многія яе ўласцівасці ў значнай ступені вызначаюцца сіламі ўзаемадзеяння паміж малекуламі.

Асноўная ўласцівасць вадкасці — цякучасць. Усе вадкасці, падобна газам, уладаюць цякучасцю; таму вадкасць прымае форму таго сасуда, у якім яна знаходзіцца. У невялікіх колькасцях свабодная вадкасць прымае форму, блізкую да шарападобнай. Шаравую форму, напрыклад, маюць кроплі дажджу або кроплі, на якія разбіваецца струмень вадкасці.

Вялікая кропля ртуці, змешчаная на гарызантальную шкляную пласцінку, сплюсчаная, маленькая — шарападобная (рыс. 144). Калі накрыць шарападобную кроплю пласцінкай, то пад дзеяннем вагі пласцінкі яна сплюсчваецца. Сплюсчанасць вялікай кроплі тлумачыцца пераважаннем вагі над малекулярнымі сіламі вадкасці. Можна чакаць, што калі даць магчымасць на вадкасць дзейнічаць толькі ўласным малекулярным сілам, то яна прыме шарападобную форму. Дослед пацвярджае такое меркаванне.



Рыс. 144. Вялікая кропля ртуці сплюсчаная, маленькая — шарападобная.

Калі зрабіць раствор солі ў вадзе, шчыльнасць якога роўна шчыльнасці аніліну, і ўвесці ў такі раствор некаторую

Вядома, што паверхня шара — найменшая пры зададзеным аб'ёме.

Вадкасць пад дзеяннем адных малекулярных сіл прымае такую форму, пры якой яе паверхня ў дадзеных умовах найменшая.

Гэтая з'ява тлумачыцца асаблівасцямі дзеяння малекулярных сіл на кожную малекулу паверхневага слоя вадкасці.

94. Паверхневае нацяжэнне. Разгледзім дзеянне малекулярных сіл на малекулу ў глыбіні і на паверхні вадкасці.

На рыс. 146 кружочак *A* абазначае малекулу ўнутры вадкасці, а *B* — на паверхні. Малекула *A* з усіх бакоў акружана іншымі малекуламі той жа вадкасці, якія прыцягваюць яе. У сярэднім усе малекулярныя сілы, якія дзейнічаюць на малекулу *A*, узаемна ўраўнаважаны. У іншым становішчы знаходзіцца малекула *B*. Над ёю знаходзіцца газ, шчыльнасць якога малая ў параўнанні са шчыльнасцю вадкасці. Таму дзеянне малекул газу на малекулу *B* можна не ўліч-

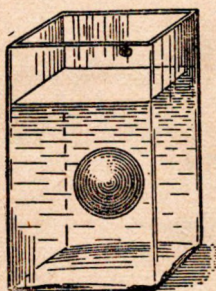


Рис. 145. Кропля аніліну ў раствору солі ў вадзе.

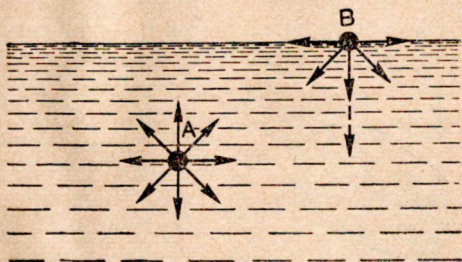


Рис. 146. Сілы, якія дзейнічаюць на малекулу вадкасці ўнутры і на паверхні вадкасці.

ваць; застаецца дзеянне малекулярных сіл вадкасці, раўнадзеючая якіх накіравана перпендыкулярна к паверхні ўнутр вадкасці. Пад дзеяннем гэтых сіл частка малекул вадкасці з паверхні імкнецца пайсці ўнутр вадкасці. Паверхневый слой вадкасці пры гэтым скарачаецца і знаходзіцца ў стане своеасаблівага нацяжэння.

Многія ўласцівасці паверхневага слоя вадкасці могуць быць растлумачаны, калі разглядаць яго ў выглядзе тонкай плёнкі з пастаянным нацяжэннем, незалежна ад яе формы і размеру.

Нагляднае ўяўленне аб гэтым даюць наступныя доследы з мыльнымі плёнкамі.

На рыс. 147 паказана драцяное кольца з прывязанай да яго ў двух пунктах ніткай. Атрымаўшы на кольца вадкую плёнку, можна заўважыць, што нітка ляжыць на ёй свабодна (рыс. 147, *a*). Але калі прарваць плёнку з якога-небудзь боку ніткі, то нітка нацягнецца, прыняўшы форму дугі акружнасці так, як паказана на рыс. 147, *б*, або так, як паказана на рыс. 147, *в*, у залежнасці ад таго, з якога боку ніткі прарвана плёнка.

Нацяжэнне ніткі можна растлумачыць, дапускаючы, што з боку вадкасці на ўсе роўныя элементы ніткі дзейнічаюць роўныя па ве-

лічыні сілы, якія накіраваны перпендыкулярна к адпаведным элементам (рис. 147, г). Гэтыя сілы называюцца сіламі паверхневага нацяжэння.

Калі пакласці на мыльную плёнку ніцяную пятлю, змочаную вадой, то, калі плёнка цэлая, пятля свабодна ляжыць на ёй (рис. 148). Калі ж унутры пятлі зрабіць пракол плёнкі, то мыльная плёнка, скарачаючыся раўнамерна, расцягне пятлю, утварыўшы ніцяное кольца.

Зацягваючы мыльную плёнкай драцяныя каркасы рознай формы, можна атрымаць розныя фігуры, кожная з якіх мае найменшую для дадзенай формы паверхню. Пад дзеяннем сіл паверхневага нацяжэння мыльная плёнка, якая зацягвае драцяны каркас той або іншай формы, скарачаючыся, прымае найменшую паверхню з магчымых пры дадзеных умовах (рис. 149).

Сіла паверхневага нацяжэння накіравана перпендыкулярна к любому элементу даўжыні лініі, якая абмяжоўвае паверхню вадкасці, і датычна да яе паверхні. Калі паверхня вадкасці плоская, то вектар сілы паверхневага нацяжэння ляжыць у плоскасці паверхні вадкасці.

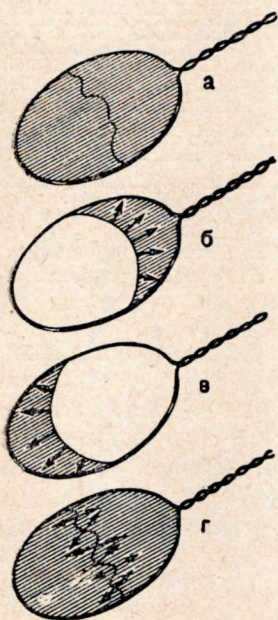


Рис. 147. а, б, в, г, — да паняцця сілы паверхневага нацяжэння.

95. Каэфіцыент паверхневага нацяжэння.

Дадзім цяпер колькасную характарыстыку паверхневага нацяжэння. Правядзём наступны дослед. Нальём у бюрэтку В вады і адкрыем крыху кран К (рис. 150) так, каб з бюрэткі павольна капала вада. Можна заўважыць, што кожная кропля паступова расце, адрываецца і падае. Калі спраектаваць канец бюрэткі з кропляй на экран, то відаць, што па меры росту кроплі паміж ёю і вадкасцю ў трубіцы ўтвараецца шыйка, якая паступова звужаецца. Адрыв кроплі С адбываецца па акружнасці шыйкі АВ (рис. 151). Значыць, гэтая акружнасць у момант адрыву з'яўляецца мяжой паверхневага слоя. Уздоўж яе дзейнічаюць сілы паверхневага нацяжэння, якія накіраваны ўверх і ўтрымліваюць кроплю.

Сілы паверхневага нацяжэння размеркаваны па даўжыні лініі; таму для ўстаўлення шукаемай намі колькаснай характарыстыкі можа служыць велічыня сілы

паверхневага нацяжэння, дзеючая на адзінку даўжыні лініі.

Велічыня, якая вымяраецца адносінай сілы паверхневага нацяжэння да даўжыні мяжы паверхневага слоя вадкасці, называецца каэфіцыентам паверхневага нацяжэння.

Абазначым каэфіцыент паверхневага нацяжэння літарай σ (грэч. «сігма»). Тады, згодна з азначэннем: $\sigma = \frac{F}{l}$, дзе F — сіла паверхне-



Рыс. 148. Пятля ў мыльнай плёнцы ляжыць свабодна, але калі прарваць плёнку ўнутры пятлі, то апошняя расцягваецца ў круг.



Рыс. 149. Плёнка, скарачаючыся, прымае найменшую магчымую паверхню.

вага нацяжэння, а l — даўжыня мяжы паверхневага слоя. Калі сілу выражаць у дынах, а даўжыню ў сантыметрах, то σ будзе вымярацца ў $\frac{\text{дын}}{\text{см}}$.

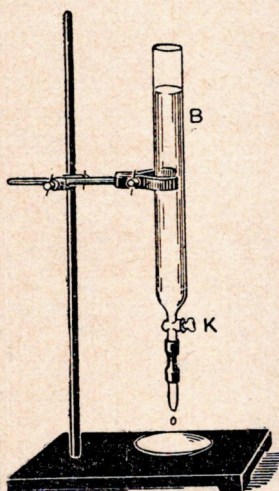
Разгледзім цяпер, як разлічыць каэфіцыент паверхневага нацяжэння вады ў нашым доследзе.

Кропля адрываецца тады, калі вага яе P становіцца большай за сілу паверхневага нацяжэння F . Калі r — радыус шыйкі AB , то $l = 2\pi r$.

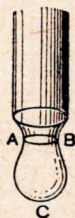
Паколькі непасрэдна перад момантам адрыву $F = P$, то мы можам напісаць:

$$\sigma = \frac{P}{2\pi r}.$$

Узважыўшы некалькі дзесяткаў кропель, можна вызначыць сярэднюю вагу асобнай кроплі і, прыняўшы r роўным унутранаму радыусу трубка (на самай справе r крыху меншы за гэты радыус), знайсці па гэтай формуле набліжана велічыню σ .



Рыс. 150. Кропля вады, якая выцякае з бюрэткі, паступова расце, адрываецца і падае.



Рыс. 151. Адрыў кроплі адбываецца па акружнасці шыйкі.

У табліцы прыведзены значэнні каэфіцыента паверхневага нацяжэння для некаторых вадкасцей.

Вадкасць	Тэмпература ў градусах С	Паверхневае нацяжэнне ў $\frac{\text{дын}}{\text{см}}$	Вадкасць	Тэмпература ў градусах С	Паверхневае нацяжэнне ў $\frac{\text{дын}}{\text{см}}$
Вада	0	75,5	Ртуць	20	470
Вада	18	74	Свінец вадкі . .	336	442
Вада	35	70	Жалеза вадкае .	1267	963
Вада	100	58,8	Плაცіна вадкая .	2000	1819
Раствор мыла . .	20	40	Вадкі вадарод . .	—253	2,1
Спірт	20	22	Вадкі гелій	—269	0,12
Эфір	25	17			

Як відаць з табліцы, з павышэннем тэмпературы паверхневае нацяжэнне ў вады памяншаецца; тое ж датычыць усіх вадкасцей.

Вельмі вялікае паверхневае нацяжэнне ў расплаўленых металаў, вельмі малае ў звадкаваных газаў, асабліва ў вадкага гелія.

На велічыню паверхневага нацяжэння ўплываюць розныя прычыны. Самыя малыя прымесі ў вадкасці вельмі мяняюць велічыню яе паверхневага нацяжэння, у большасці выпадкаў змяняючы яе. У практыцы з гэтым неабходна лічыцца; у прыватнасці, пры вызначэнні каэфіцыента паверхневага нацяжэння трэба карыстацца выключна чыстымі вадкасцямі.

Калі кінуць на паверхню вады дробныя кавалачкі камфары, то яны пачнуць рабіць складаныя, вельмі забытаныя рухі. Чым гэтыя рухі выклікаюцца?

Кавалачкі камфары ў выніку няправільнай формы ў паверхневым слоі вады раствараюцца па-рознаму. Паяўленне ж у вадзе прымесей камфары змяняе велічыню паверхневага нацяжэння вады і тым мацней, чым больш раствараецца камфары. Розніца ў велічыні паверхневага нацяжэння вады, акружаючай кавалачак камфары, і выклікае гэтыя дзівосныя рухі.

96. Змочванне. Выняўшы са шклянкі з вадой апущаную туды чыстую шкляную пласцінку, мы заўважым, што пласцінка пакрыта вадой. Да кардоннай жа пласцінкі, пакрытай парафінам або тлушчам, вада не прыстае.

Пры сутыкненні цвёрдых цел з вадкасцямі назіраюцца з'явы змочвання або нязмочвання. Вада змочвае чыстае шкло, але не змочвае парафін; ртуць змочвае цынк, але не змочвае чгун.

Змочванне вадкасцю цвёрдага цела тлумачыцца тым, што счাপленне паміж малекуламі вадкасці і змочваемага цвёрдага цела большае, чым счাপленне паміж малекуламі вадкасці. У тым выпадку, калі вадкасць не змочвае цвёрдага цела, узаемнае прыцяжэнне малекул вадкасці паміж сабою большае, чым прыцяжэнне іх да малекул цвёрдага цела.

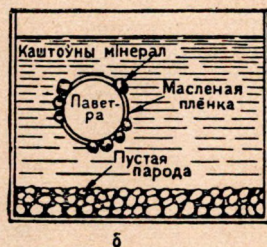
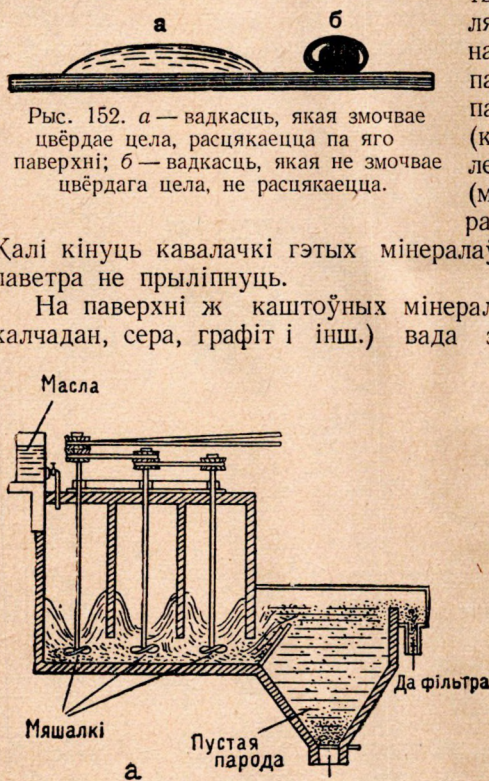
Гэтая розніца ў прыцяжэнні малекул вадкасці да цвёрдага цела прыкметная, калі наліць невялікую колькасць вадкасці на пласцінку цвёрдага цела. Калі вадкасць змочвае цвёрдае цела, яна расцякаецца па паверхні цела (рыс. 152, а). Калі ж вадкасць не змочвае цвёрдага цела, то ўтвараецца кропля (рыс. 152, б).

Неаднолькавае змочванне вадкасцямі розных цел выкарыстоўваецца для абагачэння руд, г. зн. для аддзялення ад руды

тых мінералаў, якія не з'яўляюцца прамысловай каштоўнасцю (іх называюць пустой пародай). Дослед паказвае, што па паверхні такіх мінералаў (кварц, сілікаты, вокіслы жалеза і інш.) вада расцякаецца (мае месца змочванне), утвараючы найтанчэйшую плёнку.

Калі кінуць кавалачкі гэтых мінералаў у вадку, то да іх пазурыкі паветра не прыліпнуць.

На паверхні ж каштоўных мінералаў (свінцовы бляск, медны калчадан, сера, графіт і інш.) вада збіраецца ў выглядзе кропель



Рыс. 153. а — схема флатацыйнай устаноўкі; б — да масленай плёнкі, у якой змяшчаецца паветра, прыліпаюць кавалачкі металу і ўсплываюць уверх; пустая ж парода асядае на дно сасуда.

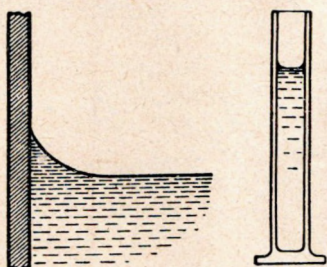
(мае месца нязмочванне), а масленыя вадкасці ўтвараюць тонкія плёнкі. Дробныя частачкі такіх мінералаў прыліпаюць да пазурыкоў паветра, завяслых у вадзе.

Для абагачэння руды яе размольваюць у парашок; апошні ўзбоўтваюць з вадсю і маслам. Атрымліваецца пена, якая складаецца з пазурыкоў паветра ўнутры масленай плёнкі. Да плёнкі прыліпаюць кавалачкі каштоўнага мінералу, якія падымаюцца з пенай уверх, а кавалачкі пустой пароды, якія не затрымліваюцца пазурыкамі паветра, асядаюць на дно камеры (рыс. 153, б). Такі прыём абагачэння розных

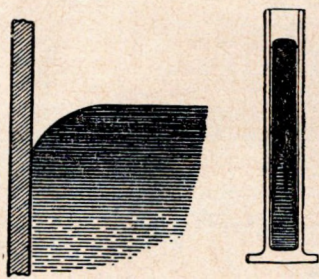
руд і роздзялення розных металаў носіць назву флатацыі (ад англ. *flatting* — усплыванне).

Адрозненнем сіл счаплення паміж малекуламі вадкасці, з аднаго боку, і малекуламі цвёрдага цела і вадкасці — з другога, абумоўліваецца скрыўленне паверхні вадкасці ля сценак сасуда.

Пры змочванні сілы счаплення паміж малекуламі цвёрдага цела і вадкасці крыху прыўзнімаюць вадкасць ля сценак сасуда, і паверхня вадкасці атрымліваецца ўвагнутай (рыс. 154а). Наадварот, у выпадку нязмочвання сілы счаплення паміж малекуламі вадкасці, накіраваныя ўнутр вадкасці, адсоўваюць яе ад сценак сасуда, і паверхня вадкасці атрымліваецца выпуклай (рыс. 154б).



Рыс. 154а. У выпадку змочвання вадкасць ля сценак крыху прыўзнята. Паверхня яе ў вузкіх сасудах увагнутая.



Рыс. 154б. У выпадку нязмочвання вадкасць ля краёў сасуда крыху апушчана. У вузкіх сасудах паверхня яе выпуклая.

97. Капілярнасць. Кавалак цукру, цагліна, прамакальная папера, ручнік і рад іншых цел убіраюць у сябе ваду. Чым гэта тлумачыцца? Ва ўсіх такіх целах ёсць мноства дробных каналаў, якія нагадваюць трубка з вельмі вузкім прасветам.

Такія трубка называюцца капілярнымі (ад лац. *capillus* — волас).

Апусцім канцы некалькіх капілярных шкляных трубак у сасуд з вадой. Вада ў гэтых трубках падымаецца значна вышэй узроўню вады ў сасудзе, і тым вышэй, чым вузейшая трубка (рыс. 155). Калі такія ж трубка апусціць у сасуд з ртуцю, то ўзровень ртуці ў іх акажацца ніжэйшым, чым узровень у сасудзе (рыс. 156).

Паверхня вадкасці ў капілярных трубках на ўсёй сваёй адлегласці крывая, яе называюць *меніскам*. Як показваюць рыс. 155 і 156, *меніск* у выпадку змочвання ўвагнуты, а пры нязмочванні — выпуклы.

Вышыня падняцця вадкасці ў капілярных трубках можа быць лёгка вылічана.

На рыс. 157 паказан павялічаны разрэз капілярнай трубка, апушчанай у вадкасць. Паверхня вадкасці ўтрымліваецца на шкле ўнутры трубка па акружнасці $2\pi r$, прычым краі паверхні амаль вертыкальныя. Сіла паверхневага нацяжэння дзейнічае ў вертыкальным

напрамку па даўжыні акружнасці $2\pi r$ вадкай плёнкі, якая прыліпла да шкла. Калі каэфіцыент паверхневага нацяжэння σ , то ўся сіла, якая ўтрымлівае вадкасць за краі паверхневай плёнкі, роўна $2\pi r\sigma$, дзе r —радыус унутранага канала трубка. Гэтая сіла ўтрымлівае слуп вадкасці вышынёй h , вага якога $\pi r^2 h Dg$, дзе D —шчыльнасць вадкасці.

Паколькі вадкасць у трубыцы знаходзіцца ў раўнавазе, то

$$2\pi r\sigma = \pi r^2 h Dg,$$

адкуль:

$$h = \frac{2\sigma}{rDg}.$$

Вышыня падняцця вадкасці ў капілярнай трубыцы прама прапарцыянальна каэфіцыенту паверхневага нацяжэння і адваротна прапарцыянальна радыусу трубки і шчыльнасці вадкасці.

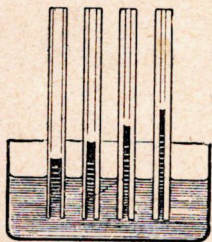


Рис. 155. У выпадку змочвання ўзроўні вадкасці ў капілярных трубках вышэйшыя за ўзровень вадкасці ў шырокім сасудзе.

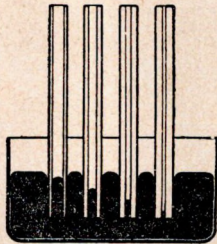


Рис. 156. У выпадку нязмочвання ўзроўні вадкасці ў капілярных трубках ніжэйшыя за ўзровень вадкасці ў шырокім сасудзе.

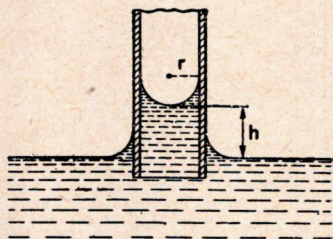


Рис. 157. Слуп вадкасці вышынёй h у капілярнай трубыцы ўтрымліваецца сіламі паверхневага нацяжэння, якія дзейнічаюць па акружнасці радыуса r .

Выведзеная намі формула прымяняльна і для нязмочваемай вадкасці, толькі ў гэтым выпадку трэба гаварыць не аб падняцці, а аб апусканні вадкасці.

Капілярнасцю тлумачыцца распаўсюджванне вадкасцей па порыстых целах, напрыклад падняцце вадкасці па кноту, пранікненне вадкасці па каменнях фундамента, падняцце вільгаці ў глебе. Капілярнасць глебы мае вельмі важнае значэнне для захавання і перамяшчэння ў ёй вільгаці — факт, з якім сур'ёзна лічацца ў сельскай гаспадарцы.

Асабліва важную ролю капілярныя з'явы адыгрываюць у біялогіі. Большасць раслінных і жывёльных тканак пранізана велізарнай колькасцю ўсяякіх каналаў, якія ўяўляюць сабой капілярныя сасуды. Рухам вадкасцей у гэтых сасудах тлумачацца такія біялагічныя з'явы, як распаўсюджванне пажыўных сокаў ад караня да верхавінак раслін.

Капілярнае падняцце вадкасці з'яўляецца фактарам, які ўлічваецца ў сельскай гаспадарцы. Справа ў тым, што вільгаць, якая знаходзіцца ў глебе, падымаецца па капілярах на паверхню і выпараецца. Каб паменшыць выпарэнне, трэба разбурыць капіляры. Гэта дасягаецца разрыхленнем глебы.

Часам трэба, наадварот, узмацніць прыток вільгаці па капілярах. Тады глебу ўкочваюць, павялічваючы гэтым колькасць капілярных каналаў.

Практыкаванне 27.

1. Паверхневае нацяжэнне вады $\sigma = 74 \frac{\text{дн}}{\text{см}}$. На якую вышыню падымаецца вада ў капілярнай трубки, радыус якой 0,05 мм?

2. У трубки дыяметрам 1 мм вада падымаецца на вышыню 30,05 мм. Вызначыць па гэтых даных паверхневае нацяжэнне вады.

РАЗДЗЕЛ X.

УЛАСЦІВАСЦІ ЦВЁРДЫХ ЦЕЛ.

98. Крышталічныя і аморфныя целы. Адрозніваюць два віды цвёрдых цел: крышталічныя і аморфныя. Абодва гэтыя віды цел істотна адрозніваюцца адзін ад другога па сваіх фізічных уласцівасцях.

Асноўнай прыкметай аднароднага крышталічнага цела з'яўляецца неаднолькавасць яго фізічных уласцівасцей па розных напрамках: цеплавога расшырэння, цеплаправоднасці, электраправоднасці, механічнай трываласці і інш. Гэтая ўласцівасць крышталю называецца анізатрапія¹.

Пакрыем пласцінку гіпсу і пласцінку шкла тонкім слоем воску або парафіну і дакранёмся да іх напаленай іголкай (рыс. 158). Мы ўбачым, што вакол пункта дакранання *O* парафін расплавіцца, прычым мяжа расплаўленай плошчы на крышталічнай пласцінцы гіпсу ўяўляе сабой эліпс (рыс. 158, *a*), на шкляной жа пласцінцы — акружнасць (рыс. 158, *b*).

Гэты дослед паказвае, што, у адрозненне ад шкла, энергія ў крышталічным гіпсе пры яго награванні распаўсюджваецца ў розных напрамках неаднолькава.

Істотнай вонкавай прыкметай крышталю з'яўляецца яго правільная геаметрычная форма, прычым характэрнай прыкметай крышталічнай формы з'яўляецца аднолькавасць адпаведных вуглоў паміж гранямі крышталю аднаго і таго ж рэчыва.

Прыкладамі крышталічных цел з'яўляюцца крышталі металаў, спажывунай солі, меднага купаросу, кварцу, квасцоў і інш. На рыс. 159 паказана сямейства крышталюў горнага хрусталу.

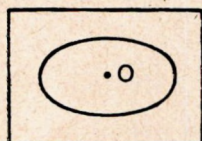
Калі цела ўяўляе сабой адзін крышталю, то яно называецца моначным крышталем (монас — адзін).

Цела, якое складаецца з мноства безладна размешчаных і зрослых паміж сабою дробных крышталікаў, называецца полікрышталічным (полі — многа).

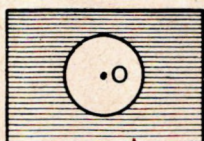
¹ Анізатрапія — ад грэч. слоў: анісас — няроўны, тропас — паварот.

Да ліку полікрышталічных цел належаць металы. Можна часам простым вокам разгледзець дробныя крышталі ў зломе моцна загартаванай сталі, чыгуну, літай латуні. Крышталічную будову некаторых іншых металаў можна выявіць пры дапамозе мікраскопа. Але некаторыя полікрышталічныя целы складаюцца з такіх дробных крышталікаў, якія нельга ўбачыць нават пры дапамозе мікраскопа.

У адрозненне ад крышталічных цел аморфныя¹ целы маюць ва ўсіх напрамках аднолькавыя фізічныя ўласцівасці.



а



б

Рис. 158. Пры дакрананні нагрэтай іголкай воск, які пакрывае пласцінку, расплаўляецца.

Прыкладамі аморфных рэчываў з'яўляюцца вар і шкло.

Кавалак вару ад удару малатком рассыпаецца на асколкі, г. зн. трымае сябе як крохкае цвёрдае цела, і разам з тым праяўляе ўласцівасці, характэрныя

вадкасцям. Цвёрдыя кавалкі вару, напрыклад, павольна расцякаюцца па гарызантальнай паверхні; вар павольна выцякае з перавернутай бочкі. Кавалкі вару, знаходзячыся ў сасудзе, паступова расцякаюцца, і вар прымае форму сасуда. Цяжкае цела павольна тоне ў вары, а лёгкія целы, змешчаныя пад слоём вару, з цягам часу ўсплываюць. Па гэтых уласцівасцях вар можна разглядаць як вельмі густую і вязкую вадкасць.

Шкло мае значную трываласць і цвёрдасць, г. зн. уласцівасці, характэрныя для цвёрдага цела, але па сваёй малекулярнай структуры яно хутчэй можа быць аднесена да вадкасцей.

У цяперашні час аморфныя целы ў выглядзе розных пластымас шырока прымяняюцца ў тэхніцы і ў быту.

Бываюць выпадкі, калі адно і тое ж рэчыва можа быць і ў крышталічным, і ў аморфным стане. Цукровы пясок, напрыклад, мае крышталічную структуру. Той жа цукровы пясок пасля расплаўлення застыае ў празрысты шклопадобны ледзянец, які з'яўляецца ўжо аморфным рэчывам. З цягам часу ледзянец «зацукроўваецца» — пакрываецца корачкай крышталічнага цукру.

Калі расплаўленую і нагрэтую крыху вышэй 300° серу выліць у халодную вадку, то атрымаецца мяккая аморфная сера, якая з цягам часу пераходзіць у крышталічную. Выяўляецца з цягам часу крышталізацыя і ў шкле, што можна назіраць па ўтварэнню ў некаторых месцах шкла матавых плям.

З гэтых назіранняў можна зрабіць вывад, што аморфны стан для цвёрдага цела не з'яўляецца ўстойлівым. У радзе выпадкаў аморфнае цела паступова пераходзіць у крышталічнае.

99. Прасторавыя рашоткі. Даследаванні крышталёў пры дапамозе рэнтгенавых праменняў, пачатыя ў 1912 г., даказалі, што правільнасць

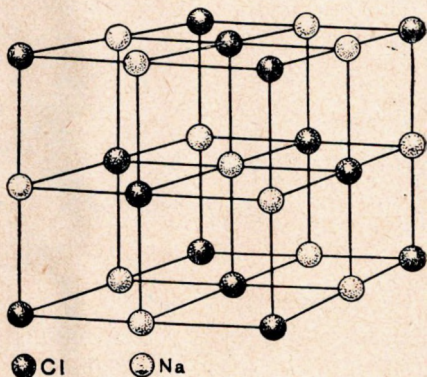
¹ Аморфас (грэч.) — бяспарменны.

форм крышталёў тлумачыцца ўпарадкаваным размяшчэннем атамаў унутры крышталю.

Калі злучыць атамы крышталю прамымі лініямі, то атрымаецца так званая прасторавая рашотка. Асобныя атамы, якія складаюць крысталі, знаходзяцца ў вузлах — пунктах перасячэння ліній, што ўтвараюць рашотку. Часта ў вузлах прасторавай рашоткі знаходзяцца дадатна або адмоўна зараджаныя атамы — іёны. На рыс. 160 дадзена схема прасторавай рашоткі спажаўной солі. Кожны дадатны іён Na знаходзіцца паміж адмоўнымі іёнамі Cl, і кожны адмоўны



Рыс. 159. Сямейства крышталёў горнага хрусталу.



Рыс. 160. Прасторавая рашотка хлорыстага натрыя.

іён Cl знаходзіцца паміж дадатнымі іёнамі Na. Унутраныя сілы, якія прымушаюць іёны Na і Cl трымацца адзін каля другога, — гэта сілы электрычнага прыцягнення.

Разнастайнасць форм крышталёў, якія сустракаюцца, тлумачыцца рознымі формамі прасторавых рашотак.

З перабудовай прасторавай рашоткі змяняюцца і фізічныя ўласцівасці рэчыва. Уласцівасць рэчыва мець некалькі крышталічных станаў называецца палімарфізмам. Прыкладам рэчыва, якое можа быць у некалькіх крышталічных станах, з'яўляецца вуглярод. Пры размяшчэнні атамаў вугляроду, паказаным на рыс. 161a, мы маем цвёрды алмаз. Пры размяшчэнні атамаў ланцужком, які ўтварае шасцівугольнік (рыс. 161б), атрымліваецца графіт. Трываласць графіту значна меншая, чым трываласць алмазу. У графіце адзін слой ланцужкоў лёгка зрушваецца адносна другога, чым тлумачыцца прымяненне графіту як смазваючага матэрыялу.

Пад уплывам знешніх уздзеянняў (ціску, тэмпературы) можа адбывацца перабудова крышталічнай структуры рэчыва. Напрыклад, дробныя крысталі жалеза і сталі могуць пераходзіць у буйныя. Асабліва хутка адбываецца гэты працэс пры страценнях, якім падпадаюць чыгуначныя рэйкі, масты і вагонныя восі. Размеры ж крышталікаў істотна ўплываюць на трываласць рэчыва. Сталь, напрыклад,

якая складаецца з дробных крышталікаў, мае большую трываласць, чым сталь, якая складаецца з буйных крышталікаў.

100. Дэфармацыя цвёрдых цел. Паміж малекуламі або атамамі цвёрдага цела таксама, як і паміж малекуламі вадкасці, акрамя сіл прыцяжэння, могуць дзейнічаць і адштурхвальныя сілы. Пры збліжэнні частчак павялічваецца сіла адштурхвання, і тым больш, чым больш мы збліжаем іх адну з другой. Пры расцяжэнні цела атрымліваюць перавагу сілы прыцяжэння, якія дзейнічаюць паміж частчкамі.

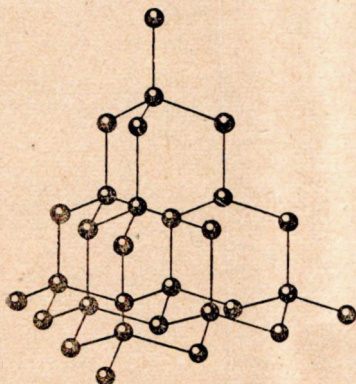


Рис. 161а. Просторавая рашотка алмазу.

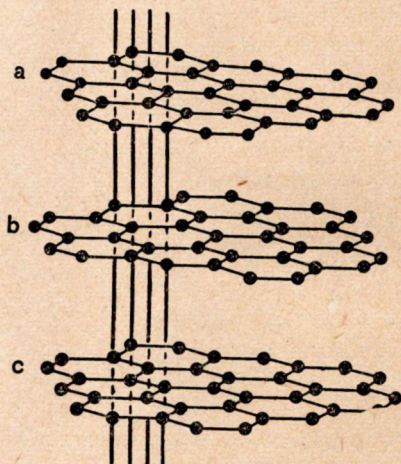


Рис. 161б. Просторавая рашотка графіту.

Механічная мадэль, паказаная на рис. 162, ілюструе характар узаемадзеяння частчак крышталю, якія размешчаны ў вузлах крышталічнай рашоткі і вагаюцца вакол становішчаў раўнавагі.

Усякае знешняе, напрыклад механічнае, уздзеянне на крышталю парушае стан раўнавагі крышталічнай рашоткі. Яно стварае ўнутры крышталю перамяшчэнне частчак, што прыводзіць да змянення формы або аб'ёму цела, г. зн. да дэфармацыі.

Разгледзім, ад чаго залежыць велічыня дэфармацыі цела. Пад велічынёй дэфармацыі трэба разумець велічыню расцяжэння, сціскання, прагіну і г. д. Звернемся да доследу.

Устанавім тонкую драўляную лінейку канцамі на дзве апоры. Лінейка ляжыць гарызантальна, яна амаль прамалінейная. Пакладзём цяпер на сярэдзіну лінейкі які-небудзь груз. Лінейка прагнецца, і з павелічэннем нагрузкі гэты прагін будзе павялічвацца.

Падвешваючы да гумавага жгуціка розныя грузы, мы выявім, што чым большая вага грузу, тым мацней расцягваецца жгуцік.

Значыць, велічыня дэфармацыі залежыць ад велічыні прыкладзенай сілы.

Прабавіўшы апісаны вышэй дослед з больш тоўстай лінейкай, мы заўважым, што пры аднолькавай нарузцы дэфармацыя будзе меншая.

Такім жа чынам тоўсты гумаваы жгуцік пад дзеяннем якога-небудзь грузу расцягваецца менш, чым тонкі жгуцік.

Устанавім зноў тонкую лінейку на дзве апоры і будзем класці на яе груз у розных месцах; мы заўважым, што велічыня дэфармацыі будзе розная.

Калі замест драўлянай лінейкі ўзяць такога ж размеру лінейку з другога матэрыялу і прарабіць з ёю апісаныя вышэй доследы, то можна даказаць, што дэфармацыя залежыць ад матэрыялу, з якога зроблена цела.

Такім чынам, доследы паказваюць, што *велічыня дэфармацыі залежыць ад размераў цела, месца прыкладання сілы, яе напрамку і матэрыялу, з якога зроблена цела.*

101. Пругкасць і пластычнасць. Мы бачылі, што ад матэрыялу, з якога зроблена цела, істотна залежыць велічыня яго дэфармацыі.

Да ліку надзвычай важных уласцівасцей матэрыялу належаць пругкасць і пластычнасць. Што гэта за ўласцівасці матэрыялу і якую ролю адыгрываюць яны ў тэхніцы? Звернемся зноў да доследу. Выгнем злёгка драўляную лінейку і адпусцім яе. Мы ўбачым, што яна выраўнуецца і прыме ранейшую форму. Значыць, пад дзеяннем сілы лінейка дэфармавалася, а пасля спынення дзеяння сілы дэфармацыя лінейкі знікла поўнасю.

Дэфармацыі, якія знікаюць у цэле пасля спынення дзеяння сіл, называюцца пругкімі дэфармацыямі.

Уласцівасць жа матэрыялу, якая заключаецца ў тым, што целы, зробленыя з яго, пад дзеяннем сіл дэфармуюцца, а пры знікненні іх аднаўляюць сваю форму і аб'ём, называецца пругкасцю.

Паўторым дослед з драўлянай лінейкай, але на гэты раз сagnём яе мацней; мы ўбачым, што лінейка разagneцца, але канчаткова не выраўнуецца. Дэфармацыя ў ёй цалкам не знікне. Дэфармацыя, якая застаецца ў цэле пасля спынення дзеяння сіл, называецца астаткавай дэфармацыяй.

Астаткавая дэфармацыя характарызуе ўласцівасць матэрыялу, якая называецца пластычнасцю.

Пругкасць і пластычнасць уласцівы ўсім цвёрдым целам.

Калі нагружаць стальную sprужыну, то можна выявіць, што пры слабых расцяжэннях яна цалкам аднаўляе размер і форму; калі ж яе расцягнуць моцна, то ў ёй выяўляюцца астаткавыя дэфармацыі.

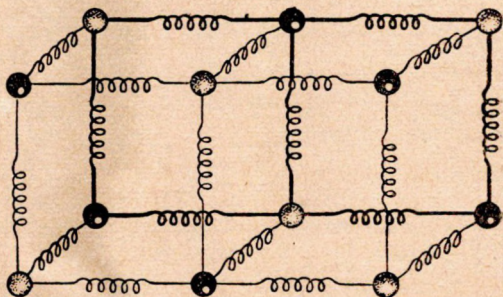


Рис. 162. Механічная мадэль узаемадзеяння частачак крышталічнай рашоткі, якія размешчаны ў вузлах прасторавай рашоткі і вагаюцца каля становішчаў раўнавагі.

Моцна сціснуты гумаваы цыліндр, напрыклад, не вяртаецца да ранейшых размераў і захоўвае бочкападобную форму.

З другога боку, калі лінейку, зробленую са свінцу, злёгка сагнуць і адпусціць, то яна выраўноўваецца. Злёгка расцягнутая свінцовая спіраль пружыніць. У гэтых выпадках свінец праяўляе пругкія ўласцівасці.

Таму падзел матэрыялаў на пругкія і пластычныя ўмоўны. Аднак на практыцы такі падзел праводзіцца.

Велічыня, якая вымяраецца адносінай нагрузкі на брусок да плошчы яго папярочнага сячэння, называецца напружаннем і выражаецца ў $\frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$ або $\frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$. Найменшае напружанне, пасля зняцця якога ва ўзоры паяўляюцца першыя прыкметы астагкавай (пластычнай) дэфармацыі, называецца мяжой пругкасці.

У цел аднолькавай формы і размеру, але зробленых з розных матэрыялаў, мяжа пругкасці розная. Ніжэй у табліцы паказаны межы пругкасці некаторых матэрыялаў.

Матэрыял і спосаб апрацоўкі	Мяжа пругкасці (у $\frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$)
Сталь вугляродзістая, катаная . . .	2570
» » каваная	1860
Сталь нікель-ванадыевая, адпушчаная	5830
Жалеза цягнутае	3160
Кальчугалюміній загартаваны	1900—2300
» халоднакатаны	3500—5000
Свінец	25
Дуб уздоўж валокнаў	250

Сіла, якая ўзнікае пры дэфармацыі пругкага цела, называецца сілай пругкасці. Сіла пругкасці працідзейнічае знешняй сіле. Чым большая дэфармацыя цела, тым большая сіла пругкасці. Сіла пругкасці знікае, як толькі знікае ўзнікшая ў пругкім целе дэфармацыя.

102. Віды дэфармацый. Пругкія дэфармацыі, узнікаючыя ў целах, могуць быць разнастайнымі.

Адрозніваюць чатыры асноўныя віды дэфармацый: расцяжэнне (або сцісканне), зрушэнне, кручэнне і выгін.

Разгледзім кожны з іх паасобку.

1. Расцяжэнне. Прыкладзём да прамога стрыжня AB сілы P , роўныя па велічыні і накіраваныя па восі стрыжня ў процілеглыя бакі (рыс. 163, а). Гэтыя сілы расцягнуць стрыжань. Можна адзін канец стрыжня A замацаваць нерухома, а да другога канца B

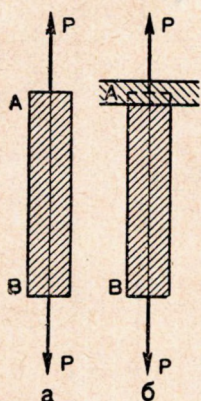
прыкладзі сілу (рыс. 163, б), вынік будзе такі ж, як і ў першым выпадку.

Чым большая велічыня сілы P , прыкладзенай да стрыжня, тым большае расцяжэнне яго.

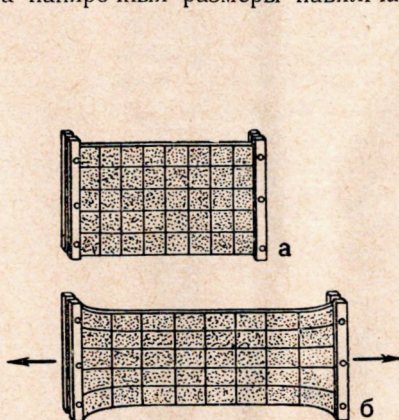
Разграфім гумаваю палоску на квадрацікі (рыс. 164, а) і расцягнем яе так, як паказана на рыс. 164, б. Мы заўважым, што адначасова з падаўжэннем палоска скарачаецца ў папярочных размерах. Гэты дослед паказвае, што пры падоўжным расцяжэнні павялічваецца даўжыня цела, але скарачаюцца папярочныя размеры яго.

Расцяжэнне адчуваюць тросы, канаты, ланцугі ў пад'ёмных транспартных устаноўках і мастах, сцяжкі паміж вагонамі ў паяздах, бэлькі будаўнічых ферм і г. д.

Калі на стрыжань AB будуць дзейнічаць сілы, накіраваныя адна насустрэч другой (рыс. 165), то ён сціснецца. Даўжыня яго пры гэтым паменшыцца, а папярочныя размеры павялічацца.



Рыс. 163. Пад дзеяннем сіл стрыжань расцягваецца.



Рыс. 164. Пры расцяжэнні квадратныя ячэйкі, якія начэрганы на гумавай палосцы, ператвараюцца ў прамавугольнікі.



Рыс. 165. Стыжань пад дзеяннем сіл сціскаецца.

Няцяжка бачыць, што дэфармацыя сціскання працілегла дэфармацыі расцяжэння.

Сцісканне адчуваюць слупы, калоны, сцены, фундаменты дамоў, стрыжні будаўнічых ферм і інш.

2. Зрушэнне. Цела можа падпасці пад дзеянне сіл, якія імкнуча зрушыць адну частку яго адносна другой так, як паказана на рыс. 166, дэфармацыя, якой падпадае цела ў гэтым выпадку, называецца зрушэннем. Уяўленне аб дэфармацыі такога характару дае зрушэнне лістоў кнігі, калі, паклаўшы кнігу на стол, перамяшчаць верхнюю частку яе паралельна аснове, якая застаецца нерухомай. Усе лісты кнігі зрушваюцца адзін адносна другога.

Калі на брусок дзейнічаюць сілы, якія накіраваны насустрэч адна да другой і якія зрушваюць адну частку бруска адносна другой так,

як паказана на рис. 167, то пры дастатковай велічыні гэтых сіл мы назіраем зразанне. Гэтая з'ява назіраецца пры рэзанні нажніцамі.

Дэфармацыі зрушэння падпадаюць, напрыклад, балты і заклёпкі, якія злучаюць асобныя металічныя канструкцыі.

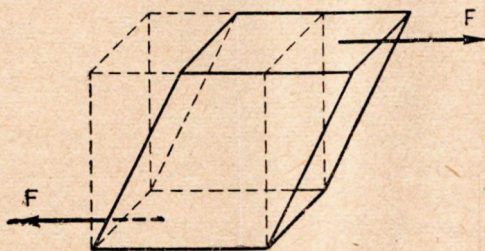


Рис. 166. Дэфармацыя зрушэння.

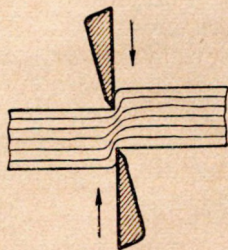


Рис. 167. Зразанне.

3. Кручэнне. Калі на стрыжань, адзін канец якога замацаван, дзейнічае пара сіл, якая ляжыць у плоскасці, перпендыкулярнай восі стрыжня, то атрымліваецца дэфармацыя, якая называецца кручэннем. Пры кручэнні асобныя слаі цела застаюцца паралельнымі паміж сабой, але павернутымі адзін адносна другога (рис. 168). Дэфармацыя кручэння ўзнікае, напрыклад, пры закручванні гаек (рис. 169). Дэфармацыі кручэння падпадаюць валы машын, восі і інш.

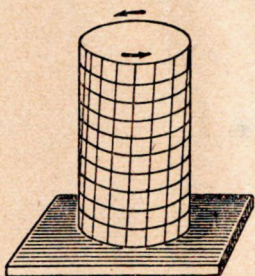


Рис. 168. Пры кручэнні слаі цела паварочваюцца адзін адносна другога.

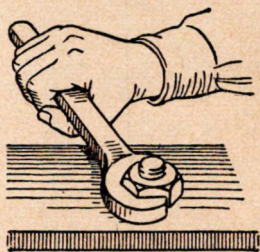


Рис. 169. Прыклад дэфармацыі кручэння.

4. Выгін. Брус, адзін канец якога замацаван, а на другі дзейнічае нагрузка, выгінаецца. Прамалінейная вось бруса ператвараецца ў крывалінейную. Найбольшы прагін у напрамку, перпендыкулярным восі, называецца стралою прагіну. Пад дзеяннем сілы прагінаецца і брус, калі ён падпёрты з абодвух канцоў (рис. 170). Калі ўздоўж бруса правесці паралельныя лініі, то пры выгіне бруса на ўвагнутым баку яго лініі пакарочваюцца, а на выпуклым баку падаўжаюцца. Гэта наглядна паказана на рис. 171. Паміж крайнімі слаямі знаходзіцца слой, які змяніў толькі сваю форму, але даўжыня яго засталася без змянення. Гэты слой называецца нейтральным

слоем. Паблізу ад нейтральнага слоя рэчыва амаль не адчувае дэфармацыі расцяжэння або сціскання. Таму суцэльныя брусy, якія падвяргаюцца выгінанню, замяняюць трубамі, бэлькі робяць таўровымі (у выглядзе літары Т) або двухтаўровымі (рыс. 172). На рыс. 172 справа паказана сячэнне рэйкі.

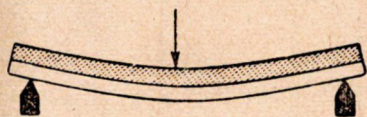
Двухтаўровая бэлька з'яўляецца па сутнасці шырокай бэлькай прамавугольнага сячэння, з якой выдалена частка сярэдняга слоя, якая, як мы бачылі, не падпадае дэфармацыі. Таму прымяненне такіх бэлек у будаўніцтве дае вялікую эканомію матэрыялу, без зніжэння будаўнічых якасцей бэлек.

Прымяняючы замест стрыжняў трубы, не толькі эканомяць матэрыял, але і аблягчаюць вагу многіх установак і машын.

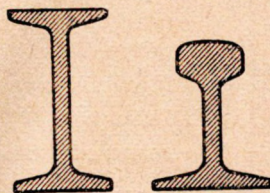
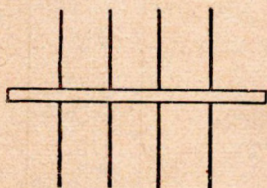
Косці жывёл маюць, як вядома, трубчастую будову, што памяншае іх вагу.

У большасці выпадкаў назіраемая на практыцы дэфармацыя з'яўляецца спалучэннем некалькіх асноўных дэфармацый адначасова.

Можна паказаць, што любы від дэфармацыі зводзіцца да двух найбольш простых: расцяжэння (або сціскання) і зрушэння.



Рыс. 170. Пры выгіне ўвагнуты бок бруса сціскаецца, выпуклы расцягваецца.



Рыс. 171. Размяшчэнне спіц паказвае, што адзін бок выгінаемага цела расцягнут, а другі сціснут.

Рыс. 172. Злева—сячэнне двухтаўровой бэлькі, справа — сячэнне рэйкі.

У выпадку дэфармацыі расцяжэння сілы, якія дзейнічаюць на цела, накіраваны перпендыкулярна плошчы сячэння цела, а ў выпадку зрушэння яны дзейнічаюць па датычнай да гэтай плошчы.

102а. Цвёрдасць. Пад цвёрдасцю матэрыялу разумеюць здольнасць яго аказваць супраціўленне пранікненню ў яго другога, больш цвёрдага цела.

Цвёрдасць прыходзіцца ўлічваць пры выкарыстанні матэрыялу ў розных збудаваннях, а таксама пры вырабе рэжучых інструментаў — свердзелаў, разоў, фрэз і інш.

Для вызначэння цвёрдасці металаў існуе некалькі спосабаў. Адным з найбольш пашыраных з'яўляецца спосаб, які заключаецца ва ўцісканні сталёнага загартаванага шарыка ў выпрабуемы метал.

Калі ўціскаць у даследуемы метал сілай P сталыны загартаваны шарык дыяметрам D , як паказана на рыс. 172а, то шарык уціснецца на некаторую глыбіню h у метал і пакіне ў ім адбітак у выглядзе круглай ямачкі дыяметрам d .

Велічыня, якая характарызуе цвёрдасць, абазначаецца праз H_B і вылічваецца па формуле:

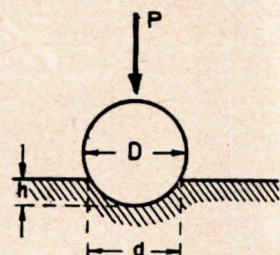
$$H_B = \frac{P}{S} \frac{\kappa\Gamma}{\text{мм}^2},$$

дзе P — нагрузка на шарык у $\kappa\Gamma$;

S — велічыня паверхні ямачкі ў мм^2 .

Выпрабаванні на цвёрдасць часта робяць на гатовых вырабах. Чым меншая таўшчыня вырабу, тым меншага дыяметра бярэцца шарык і тым з меншай сілай ён уціскаецца ў выраб.

Ніжэй у табліцы дадзены велічыні, якія характарызуюць цвёрдасць некаторых металаў.



Рыс. 172а. Да вызначэння цвёрдасці.

Матэрыял	Цвёрдасць $\left(\text{у } \frac{\kappa\Gamma}{\text{мм}^2} \right)$
Сталь	150—300
Сталь цвёрдая	да 850
Чыгун	130—300
Алюміній катаны	45
Медзь	60
Белы метал (для падшыпнікаў) . .	20—28

Цвёрдасць крышталічных цел у значнай ступені залежыць ад стану іх паверхні. На паверхні крышталяў звычайна ёсць невялікія трэшчыны, павелічэнне якіх памяншае цвёрдасць крышталя. Даследаваннямі ўстаноўлена, што пры змочванні крышталя растворамі некаторых рэчываў апошнія пападаюць у гэтыя трэшчыны і садзейнічаюць разбурэнню крышталя, г. зн. памяншаюць цвёрдасць яго. З'ява памяншэння цвёрдасці крышталя пры яго змочванні выкарыстоўваецца ў бурэнні цвёрдых парод.

1026. Закон Гука. Да ўсіх відаў дэфармацый, разгледжаных намі ў § 102, можа быць прыменен адзін агульны закон, які адкрыў англійскі вучоны Гук (1635—1703).

Закон Гука фармулюецца наступным чынам:

У межах пругкасці велічыня дэфармацыі прапарцыянальна велічыні дэфармуючай сілы.

Так, велічыня расцяжэння або сціскання стрыжня будзе тым большай, чым большая расцягваючая або сціскаючая сіла; велічыня

прагіну бэлькі будзе прапарцыянальна нагрузцы на бэльку, вугал зрушэння прапарцыянальны велічыні дзеючай на цела сілы і г. д.

Разгледзім больш падрабязна прымяненне закону Гука да дэфармацыі расцяжэння.

На рыс. 1726 паказан вертыкальна падвешаны дрот, свабодны канец якога нагружаецца грузам P .

Няхай l_0 — першапачатковая даўжыня дроту, l — даўжыня яго пасля дэфармацыі.

Велічыня $l - l_0$ называецца абсалютным падаўжэннем дроту пры расцяжэнні. Пры дадзенай нагрузцы абсалютнае падаўжэнне залежыць ад першапачатковай даўжыні дроту. Чым большая гэтая даўжыня, тым большае і абсалютнае падаўжэнне. Такім чынам, абсалютнае падаўжэнне не можа з'яўляцца мерай дэфармацыі рэчыва. Таму за меру дэфармацыі прымаецца падаўжэнне, аднесенае да адзінкі першапачатковай даўжыні дроту, г. зн. велічыня $\frac{l - l_0}{l_0}$. Гэтая велічыня называецца адносным падаўжэннем.

Абазначым плошчу папярочнага сячэння дроту літарай S . Падзяліўшы нагрузку P на плошчу сячэння дроту S , мы атрымаем велічыню напружання, якую абазначым літарай σ .

$$\text{Такім чынам, } \sigma = \frac{P}{S}. \quad (1)$$

Закон Гука для дэфармацыі расцяжэння выразіцца так: **адноснае падаўжэнне ў межах пругкасці прапарцыянальна напружанню**, г. зн.

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha \sigma. \quad (2)$$

Велічыня α называецца каэфіцыентам лінейнага расцяжэння.

$$\text{Пры } \sigma = 1 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} \quad \alpha = \frac{l - l_0}{l_0}, \text{ г. зн. } \text{каэфіцыент лі-}$$

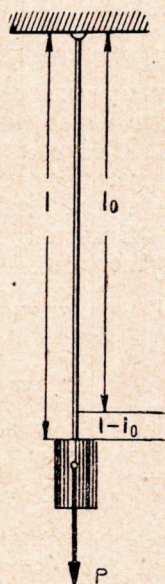
нейнага расцяжэння лікава ровен адноснаму падаўжэнню пры напружанні, роўным адзінцы.

Падставім у формулу (2) замест σ яго выражэнне, узятае з роўнасці (1):

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \alpha \frac{P}{S}, \text{ або } l - l_0 = \alpha \frac{P \cdot l_0}{S}.$$

У тэхнічнай літаратуры прынята рабіць разлікі не па каэфіцыенту расцяжэння, а па велічыні $E = \frac{1}{\alpha}$; гэтую велічыню называюць модулем пругкасці.

Які фізічны сэнс мае гэтая велічыня? Разгледзім канкрэтны прыклад.



Рыс. 1726. Да закону Гука.

Дрот даўжынёю ў 5 м і сячэннем у 2 мм² пры нагрузцы ў 40 кг падоўжыўся на 5 мм. Вызначыць каэфіцыент расцяжэння і модуль пругкасці дроту.

Па формуле $l - l_0 = \frac{\alpha Pl_0}{S}$ знаходзім:

$$5 \text{ мм} = \alpha \frac{40 \text{ кг} \cdot 5000 \text{ мм}}{2 \text{ мм}^2}; \quad \alpha = \frac{5 \text{ мм} \cdot 2 \text{ мм}^2}{40 \text{ кг} \cdot 5000 \text{ мм}} = \frac{1}{20\,000} \frac{\text{мм}^2}{\text{кг}}.$$

Рашаючы прыклад, мы вызначылі, што даўжыня дроту сячэннем у 1 мм² пры нагрузцы ў 1 кг павялічваецца на $\frac{1}{20\,000}$ долю першапачатковай даўжыні. Пры нагрузцы ж у 20 000 $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ даўжыня дроту павялічылася б у два разы. Значыць, **модуль пругкасці абазначае напружанне, якое трэба прыкладзі да дроту, каб падвоіць яго даўжыню**. Практычна такая нагрузка зусім немагчыма, таму што ўсе матэрыялы, акрамя гумы, разарвуцца значна раней, чым атрымаюць такое падаўжэнне.

Значэнні модуля пругкасці некаторых матэрыялаў прыведзены ў табліцы.

Матэрыялы	$E \left(\text{у } \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \right)$
Сталь	2,0—2,2 · 10 ⁶
Медзь	10 ⁶
Чыгун	0,75—1,6 · 10 ⁶
Алюміній	0,7 · 10 ⁶
Свінец	1,7 · 10 ⁵
Дрэва	10 ⁵

Практыкаванне 28.

1. Круглы стальны брус ($d = 2 \text{ см}$) даўжынёю 16 м расцягваецца сілай, роўнай 3,6 Т. Знайсці падаўжэнне гэтага бруса і напружанне ў ім.

2. Стальны дрот падаўжаецца на 2 мм пры дзеянні на яго грузу ў 32 кг. Вылічыць работу сілы, якая выклікае дэфармацыю падаўжэння.

103. Трываласць. Запас трываласці. Першае патрабаванне, якое ставіцца да ўсякага збудавання або вырабу, — гэта трываласць. Трываласцю матэрыялу называецца яго ўласцівасць супраціўляцца дзеянню знешніх сіл, не разбураючыся.

Напружанне, пры якім матэрыял, што падпаў пад дэфармацыю, разбураецца, называецца мяжой трываласці.

Для некаторых матэрыялаў мяжа трываласці ўказана ніжэй у табліцы.

Зусім відавочна, што ў розных збудаваннях, каб пазбегнуць паломак і разбурэнняў, нельга нагружаць дэталі так, каб напружанне

было роўна або блізка да мяжы трываласці. Практычна дапушчальнае напружанне выбіраюць так, каб яно склала толькі некаторую частку ад мяжы трываласці.

Лік, які паказвае, у колькі разоў мяжа трываласці большая за дапушчальнае напружанне, называецца запасам трываласці, або каэфіцыентам бяспекі.

Устанаўленнем запасу трываласці для розных збудаванняў займаюцца асобныя дзяржаўныя органы, якія вырашаюць гэтую важную задачу, карыстаючыся як тэхнічнымі, так і эканамічнымі данымі. Для сталі, напрыклад, бяруць запас трываласці ў сярэднім ад 2,5 да 4, для жалеза ад 4 да 5, для чыгуну ад 6 да 8, для дрэва ад 8 да 10.

Велічыня запасу трываласці выбіраецца ў залежнасці ад роду збудавання і ад характару яго нагрузкі. Пры спакойных нагрузках запас трываласці меншы, чым пры пераменных нагрузках; ён асабліва вялікі ў збудаваннях, якія падпадаюць пад розныя ўдары.

Матэрыялы	Мяжа трываласці $\left(у \frac{кг}{см^2} \right)$	
	пры расцяжэнні	пры спісканні
Сталь з 0,14% вугляроду	5000	4000
Сталь інструментальная з 0,96% вугля- роду	9500	6700
Стальны дрот	8000	—
Чыгун	1000—2200	3700—8800
Медзь	2400	4200
Свінец	130—220	—
Дуб	700	700
Сасна	700	200
Цэгла	20	60

Практыкаванне 29.

1. Два дроты зусім аднолькавыя, за выключэннем даўжыні: адзін 150 см, другі 300 см. Першы дрот разрываецца пры грузе 12 кг. Якая сіла патрэбна для разрыву другога дроту?

2. Папярочнае сячэнне дроту роўна $0,00258 \text{ см}^2$. Ён разрываецца пад дзеяннем сілы 22,7 кг. Знайдзі мяжу трываласці гэтага дроту.

3. Якая сіла патрэбна для разрыву струны дыяметрам 0,1 см, калі мяжа трываласці матэрыялу гэтай струны роўна $80 \frac{кг}{мм^2}$?

4. Стальная паласа шырынёю 160 мм і таўшчынёю 12 мм расцягваецца сілай $F = 20 \text{ Т}$. З якім запасам трываласці працуе паласа, калі мяжа трываласці для сталі, з якой яна зроблена, роўна $4200 \frac{кг}{см^2}$? Мяжа пругкасці роўна $1800 \frac{кг}{см^2}$.

Чаму ровен найменшы запас трываласці, пры якім напружанне не перавышае мяжы пругкасці?

103а. Значэнне ўласцівасцей матэрыялаў для іх апрацоўкі і прымянення. Металы маюць больш высокую трываласць у параўнанні з іншымі матэрыяламі, таму дэталі машын, механізмаў і многіх збудаванняў звычайна робяцца з металаў.

Для вырабу рэжучых і іншых інструментаў прымяняюцца спецыяльныя інструментальныя сталі. Вымяральныя інструменты, напрыклад, вырабляюцца з асобых сартоў сталі, якія змяшчаюць прымесь хрому, нікелю, малібдэну, марганцу. Пасля загартоўкі сталь такога саставу мае павышаную трываласць.

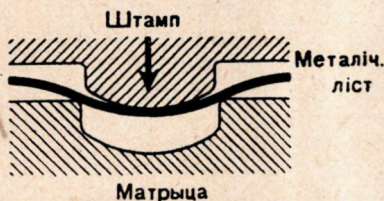


Рис. 173а. Схема штампавання.

Вялікае значэнне ў машынабудаванні маюць пругкія ўласцівасці матэрыялаў. Пры рабоце машыны яе дэталі падпадаюць пад дзеянне розных нагрузкаў і дэфармуюцца пад іх дзеяннем. Відавочна, што гэтыя дэфармацыі не павінны быць астаткавымі, інакш парушылася б работа машын: адны дэталі машыны пакараціліся б, другія, наадварот, падоўжыліся б.

Нарэшце, машына перастала б працаваць.

Пластычныя ўласцівасці металаў шырока выкарыстоўваюцца пры іх апрацоўцы ціскам: пры пракатцы, валачэнні, штампаванні, каванні і г. д.

Каваннем называецца апрацоўка металу ціскам, у выніку якой змяняецца як знешняя форма, так і структура металу.

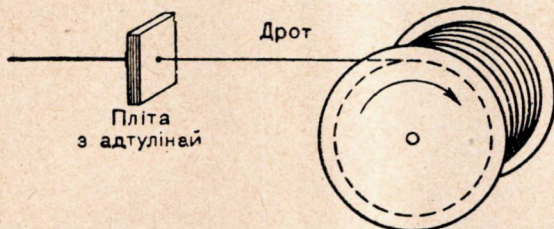


Рис. 173б. Схема валачэння.

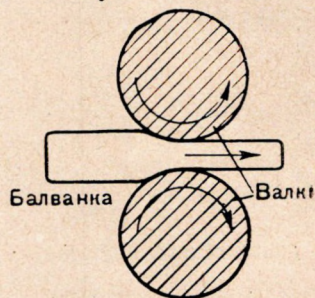


Рис. 173в. Схема пракаткі.

Існуюць два віды кавання: свабоднае каванне і каванне ў штампам.

Штампаванне дэталей звычайна робіцца пры дапамозе сталёвых штампаў на прэсах і молатах (механічных або гідраўлічных). Ліст металу, напрыклад, кладзецца паміж двума палавінкамі формы: штампа і матрыцы (рис. 173а). Гідраўлічны або іншы спецыяльны прэс цісне на штамп. Металічны ліст выгінаецца і ў выніку астаткавай дэфармацыі прымае неабходную форму.

Штампаванне можна зрабіць рознымі матэрыяламі: сталь, латунь, алюміній, пластык, кардон і інш. Штампаваннем вырабляюцца пасуда, часткі

карпусоў аўтамабіляў і самалётаў, дэталі для гадзіннікавых механізмаў і інш.

Валачэннем называецца такі від апрацоўкі ціскам, пры якім апрацоўваемы матэрыял правалочваецца (працягваецца) праз рад паступова памяншаючыхся адтулін у металічных пласцінах (валачыльных дошках). Адтуліны (вочкі) маюць форму конусаў, зробленых у цвёрдай сталі.

Валачэннем вырабляюцца розныя сарты дроту, трубы малюга дыяметра, прутковы матэрыял рознага профілю з дакладнымі размерамі і інш.

На рыс. 173б паказана схема валачэння: дрот працягваецца праз канічную адтуліну ў пліце.

Пракатка праводзіцца для атрымання патрэбнага профілю металу. Шляхам пракаткі са зліткаў сталі, а таксама з каляровых металаў і сплаваў атрымліваюць лісты, сартавыя і фасонныя профілі і г. д.

Прадукцыяй пракаткі з'яўляюцца або гатовыя вырабы (рэйкі, бэлькі і інш.), або загатоўкі для наступнай апрацоўкі каваннем, штампоўкай, валачэннем або рэзаннем.

Працэс пракаткі заключаецца ў тым, што нагрэты злітак або загатоўка — балванка (рыс. 173в) — прапускаецца паміж валкамі пракатнага стана, якія верцяцца. Пры гэтым адбываецца змяненне формы загатоўкі, а таксама памяншэнне папярочнага сячэння і павелічэнне яе даўжыні да зададзенага размеру.

Метал, нагрэты да высокай тэмпературы, звычайна мае вялікую пластычнасць. З паніжэннем тэмпературы метал робіцца менш пластычным і з цяжкасцю паддаецца дэфармацыі. У сувязі з гэтым імкнучца пракатваць металы і сплавы ў гарачым выглядзе. Халодная пракатка прымяняецца толькі для атрымання тонкіх вырабаў (металічныя стужкі, лісты для пружын і інш.).

Надзвычай каштоўным будаўнічым матэрыялам з'яўляецца дрэва, якое мае малую ўдзельную вагу і высокую трываласць. Недахопам драўляных збудаванняў з'яўляецца іх недаўгавечнасць, а ў многіх выпадках грувасткасць.

За апошнія гады разнастайнае ўжыванне атрымалі штучныя матэрыялы — пластычныя масы (пластмасы). Для вырабу іх карыстаюцца рознымі смоламі. Так, напрыклад, шкло, якое не б'ецца, — плексіглас — атрымліваюць са смалы, для вытворчасці якой выкарыстоўваюцца ацэтон, метылавы спірт і сінільная кіслата.

Вырабы з пластмас атрымліваюць галоўным чынам шляхам прэсавання, прымяняюць таксама ліццё.

Трываласць на разрыв у пластмас парадку $300 - 600 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ і ў два-тры разы большая на сцісканне.

РАЗДЕЛ XI.

ЗМЯНЕННЕ АГРЕГАТНАГА СТАНУ РЭЧЫВА.

104. Плаўленне цел. Плаўленнем называецца працэс ператварэння рэчыва з цвёрдага стану ў вадкі.

Тэмпература, пры якой дадзенае рэчыва павіцца, носіць назву тэмпературы або пункта яго плаўлення.

Крышталічныя рэчывы, як, напрыклад, жалеза, медзь, серабро, ртуць, лёд маюць зусім пэўную тэмпературу плаўлення.

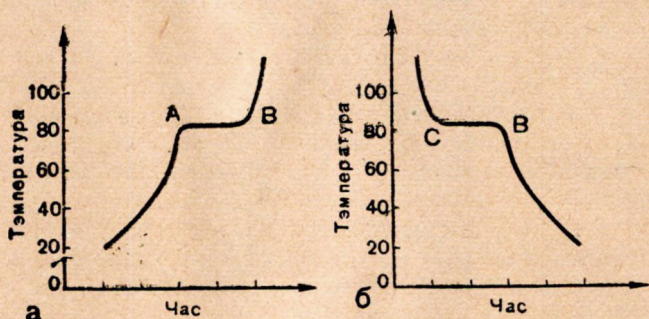


Рис. 174. Графік тэмпературы плаўлення (а) і зацвердзявання (б) нафталіну.

Калі нагрэць якое-небудзь крышталічнае цела, то можна заўважыць, што яго тэмпература будзе павышацца толькі да моманту пачатку плаўлення цела; у час плаўлення тэмпература павышацца не будзе. **У працэсе плаўлення крышталічнага цела, г. зн. калі яно існуе адначасова як у вадкім, так і ў цвёрдым стане, тэмпература цела застаецца нязменнай.**

Пасля таго як усё цела прайойдзе ў вадкі стан, далейшае нагрыванне павядзе да павышэння тэмпературы вадкасці. На рис. 174, а ў якасці прыкладу паказан графік плаўлення нафталіну. Працэсу плаўлення нафталіну адпавядае ўчастак крывой АВ. Графік жа працэсу зацвердзявання нафталіну паказан на рис. 174, б. Працэсу зацвердзявання адпавядае ўчастак крывой СВ.

На рис. 174 відаць, што зацвердзяванне нафталіну адбываецца пры той жа тэмпературы, пры якой нафталін плавіцца. Такі ж вывад можна зрабіць у адносінах любога крышталічнага цела.

Крышталічныя цвёрдыя целы плавяцца і зацвердзяюць пры адной і той жа пэўнай для кожнага рэчыва тэмпературы.

Інакш трымаюць сябе аморфныя рэчывы, напрыклад смала, воск, каніфоль, шкло і інш. Пры награванні яны паступова робяцца мякчэйшымі, тэмпература іх змяняецца бесперапынна. Пры зацвердзяванні аморфных цел тэмпература іх таксама паніжаецца бесперапынна (рис. 175). Значыць, *аморфныя рэчывы не маюць пэўнай тэмпературы плаўлення і зацвердзявання.*

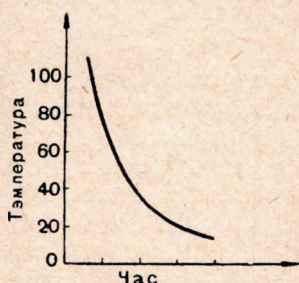


Рис. 175. Графік змянення тэмпературы застываючай смалы.

Тэмпература плаўлення і зацвердзявання розных рэчываў.

Назва рэчыва	Тэмпература плаўлення і зацвердзявання (у градусах C)	Назва рэчыва	Тэмпература плаўлення і зацвердзявання (у градусах C)
Вугаль	3800	Магній	650
Вальфрам	3370	Цынк	419
Плаціна	1774	Свінец	327
Жалеза чыстае	1530	Вісмуг	271
Чыгун белы	1200	Волава	232
Медзь	1083	Калій	63
Золата	1063	Вада	0
Латунь	1000	Ртуць	— 39
Серабро	961	Кісларод	—219
Бронза	900	Вадарод	—257
Алюміній	658	Гелій	—272

Плаўленне крышталічных цел можна растлумачыць на аснове малекулярна-кінетычнай тэорыі. Мы ўжо гаварылі (гл. § 69), што пры павышэнні тэмпературы ўзрастае сярэдняя скорасць хаатычнага руху частчак рэчыва. Вынікам гэтага з'яўляецца аслабленне сіл, якія звязваюць частчкі ў цвёрдым целе і абумоўліваюць пэўную яго структуру. Пры набліжэнні да тэмпературы плаўлення сілы гэтыя настолькі аслабляюцца, што структура цвёрдага цела парушаецца, разбураецца прасторавая рашотка крышталю — адбываецца пераход рэчыва ў вадкі стан.

105. Удельная теплота плавления. При плавлении адбываецца разбурэнне прасторавай рашоткі крышталічнага цела, на што расходуюцца пэўная колькасць энергіі ад якой-небудзь знешняй крыніцы. У выніку гэтага ўнутраная энергія цела ў працэсе плавления павялічваецца.

Колькасць цеплыні, неабходная для пераходу цела з цвёрдага стану ў вадкі пры тэмпературы плавления, называецца цеплынёй плавления.

У працэсе зацверджвання цела, наадварот, унутраная энергія цела памяншаецца; частка яе пры гэтым выдзяляецца і перадаецца акружаючым целам.

Колькасць цеплыні, якая паглынаецца целам пры плавлении, роўна колькасці цеплыні, выдзеленай гэтым целам пры зацверджванні. У гэтым факце знаходзіць адно з сваіх выражэнняў закон захавання і ператварэння энергіі.

Паглыннем энергіі пры раставанні лёду і выдзяленнем яе пры замярзанні вады тлумачацца тыя спазненні ў пахаладанні і пацяпленні, якія часта маюць месца паблізу вялікіх рэк і азёр.

Цеплыню плавления розных рэчываў звычайна характарызуюць колькасцю цеплыні, якая неабходна для расплавления адзінкі масы дадзенага рэчыва.

Колькасць цеплыні, неабходная для пераходу адзінкі масы рэчыва з цвёрдага стану ў вадкі пры тэмпературы плавления, называецца ўдзельнай цеплынёй плавления.

Удельная теплота плавления выражаецца ў $\frac{\text{кал}}{\text{г}}$ або ў $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

Вызначэнне ўдзельнай цеплыні плавления тугаплаўкіх рэчываў з'яўляецца цяжкай эксперыментальнай задачай, але ўдзельная теплота плавления лёгкаплаўкіх рэчываў можа быць вызначана пры дапамозе каларыметра. Пакажам на прыкладзе лёду, як гэта робіцца.

Нальём у каларыметр m_1 грамаў вады пры тэмпературы t_1° ; удзельную цеплаёмкасць вады абазначым праз c_1 . Няхай маса каларыметра m_2 грамаў і ўдзельная цеплаёмкасць яго c_2 . Кінем у каларыметр m грамаў лёду, які пачаў раставаць, г. зн., які мае тэмпературу 0°C . Памешваючы ваду, дачакаемся, пакуль увесь лёд не растане, і адначым канчатковую тэмпературу сумесі θ° (грэч. «тэта»). З гэтых даных можна вызначыць удзельную теплоту плавления лёду; абазначым яе праз λ .

Колькасць цеплыні, атрыманая лёдам пры ператварэнні яго ў ваду пры 0°C :

$$Q = \lambda m.$$

Колькасць цеплыні, атрыманая вадою, якая ўтварылася ад растаўшага лёду, пры награванні яе ад 0°C да θ° :

$$Q_1 = c_1 m (\theta - 0^\circ) = c_1 m \theta.$$

Колькасць цеплыні, аддадзеная вадою, якая была да доследу ў каларыметры:

$$Q_2 = c_2 m_2 (t_1 - \theta).$$

Колькасць цеплыні, аддадзеная ўнутраным сасудам каларыметра:

$$Q_3 = c_3 m_3 (t - \theta).$$

$$Q + Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

$$\lambda m + c_1 m \theta = c_1 m_1 (t_1 - \theta) + c_2 m_2 (t_1 - \theta);$$

$$\lambda = \frac{c_1 m_1 (t_1 - \theta) + c_2 m_2 (t_1 - \theta) - c_1 m \theta}{m}.$$

Доследы даюць для ўдзельнай цеплыні плаўлення лёду велічыню, роўную $80 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$.

Удзельная цеплыня плаўлення розных рэчываў.

Назва рэчыва	Удзельная цеплыня плаў- лення ў $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	Назва рэчыва	Удзельная цеплыня плаў- лення ў $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$
Алюміній	92,4	Плაცіна	27
Лёд	80	Чыгун шэры	23
Нікель	65	Волава	14
Жалеза	66	Свінец	6,3
Медзь	42	Ртуць	2,8

106. Змяненне аб'ёму цел пры плаўленні і зацвердзяванні. Дослед паказвае, што пры плаўленні цела яго аб'ём змяняецца. У большасці рэчываў аб'ём пры плаўленні павялічваецца, пры зацвердзяванні ж гэтых рэчываў аб'ём іх памяншаецца. Але ёсць рэчывы, аб'ём якіх пры плаўленні памяншаецца, а пры зацвердзяванні павялічваецца. Прыкладам такіх рэчываў з'яўляецца лёд, аб'ём якога памяншаецца пры плаўленні прыблізна на 10% (шчыльнасць лёду пры 0°C каля 0,9, вады — каля 1). Як вядома, гэтая ўласцівасць лёду і вады мае вялікае значэнне ў прыродзе і тэхніцы. З прычыны меншай шчыльнасці лёду ў параўнанні з вадой лёд плавае на вадзе. Маючы дрэнную цеплаправоднасць, слой лёду ахоўвае масу вады, якая ляжыць пад ім, ад ахаладжэння да тэмпературы зацвердзявання. Таму рыбы і іншыя жывыя істоты, якія знаходзяцца ў вадзе, не гінуць у час маразоў.

Водаправодныя трубы павінны быць ахаваны ад холаду, таму што лёд, які пры гэтым утвараецца, займае аб'ём большы, чым вада, і трубы могуць разарвацца.

Пры змяненні ціску змяняецца і тэмпература плаўлення цел. У рэчываў, аб'ём якіх пры плаўленні павялічваецца, тэмпература плаўлення з павелічэннем ціску павышаецца; у такіх жа рэчываў, як вада і чыгун, у якіх аб'ём пры плаўленні памяншаецца, тэмпература плаўлення пры павелічэнні ціску паніжаецца.

Пры вялікіх цісках, парадку тысяч атмасфер, рэзка мяняюцца многія ўласцівасці рэчываў.

Многія рэчывы пры дапамозе спецыяльна сканструяваных прэсаў падвяргаліся ціску ў некалькі дзесяткаў і нават соцень тысяч атмасфер. Пры гэтых велізарных цісках у некаторых рэчываў выяўляўся рад незвычайных уласцівасцей. Так, напрыклад, вада, сціснутая да $\frac{3}{4}$ яе аб'ёму пры нармальным ціску, зацвердзяе, знаходзячыся ў гарачым стане; медзь пад выскім ціскам цяэ, як мяккае сметанковае масла, а вадарод праходзіць скрозь сталёную пласцінку таўшчыняю каля 5 см.

107. Ліццё металаў. На ўласцівасці металаў плавіцца і зацвердзяваць грунтуецца ліцейная вытворчасць.

У ліцейнай вытворчасці шляхам запаўнення вадкім металам спецыяльных форм, у якіх метал зацвердзяе, атрымліваюць розныя дэталі.

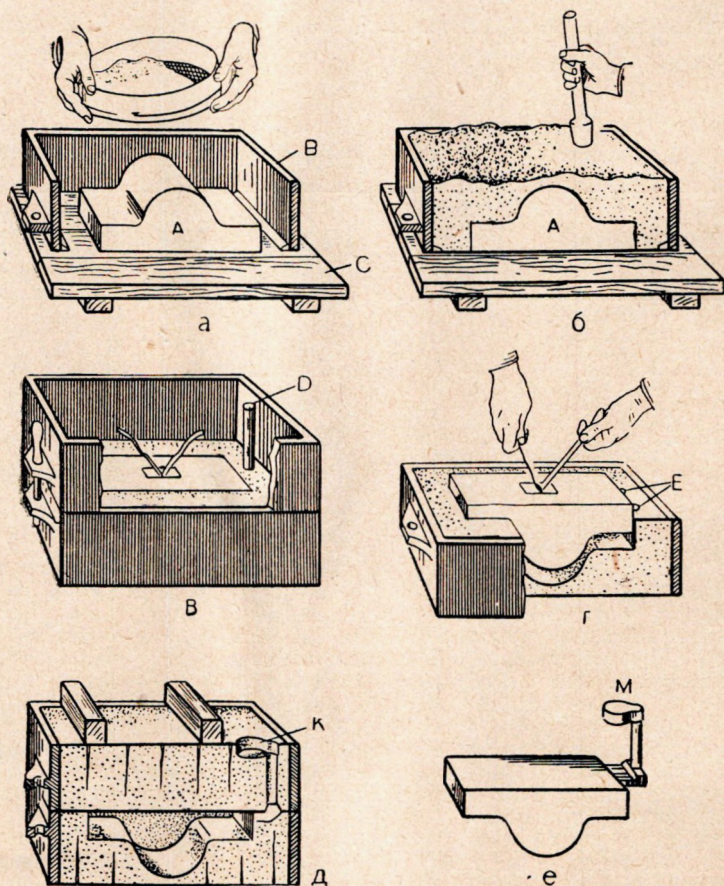


Рис. 176. Паслядоўныя стадыі адліўкі дэталі.

Ліццё дэталі шырока прымяняюцца ў станках, машынах і механізмах, складаючы ад 50 да 85% іх вагі.

Шляхам адліўкі можна вырабляць дэталі, самыя разнастайныя па форме і размерах. Для дэталей складанай формы адліўка з'яўляецца адзіным спосабам іх вырабу.

Для адліўкі якой-небудзь дэталі спачатку з дрэва або з металу робяць мадэль гэтай дэталі. Форма мадэлі А на рис. 176 адпавядае форме гатовай адліўкі.

Паколькі ўсе металы пры ахаладжэнні змяняюць свае лінейныя размеры, мадэль робіцца большай за адліўку на велічыню ўсадкі. Для розных металаў і сплаваў велічыня ўсадкі складае ад 1 да 2,5%.

Мадэль дэталі *A* ўстанаўліваецца на так званы падмадэльны шчыток *C* (рыс. 176, *a*) і накрываецца апокай *B*. Апокі ўяўляюць сабою скрынкі без дна і без накрыўкі з чыгуну, сталі або алюмініевых сплаваў. Па форме яны могуць быць прамавугольнымі, круглымі або фасоннымі, у залежнасці ад контуру адлівак.

Апоку запаўняюць фармовачнай сумессю, якая складаецца з пяску, гліны і іншых рэчываў. Працэнтныя суадносіны складаючых у сумесі залежаць ад віду ліцця. Фармовачная сумесь павінна быць пластыванай, досыць трывалай, вогнетрывалай і газаванікальнай.

Пасля таго як мадэль устаноўлена на шчыток і накрыта апокай, апоку запаўняюць фармовачнай сумессю, якую ўшчыльняюць (рыс. 176, *b*). Лішнюю фармовачную сумесь пасля ўшчыльнення зграбаюць з паверхні апокі лінейкай. Затым апоку пераварочваюць, накладваюць на яе другую (верхнюю) апоку і ўстанаўліваюць мадэль стаяка *D* (рыс. 176, *в*), які служыць для ўтварэння адтуліны, праз якую форма запаўняецца металам.

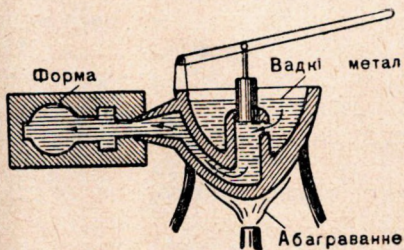


Рис. 177. Схема ліцця пад ціскам.

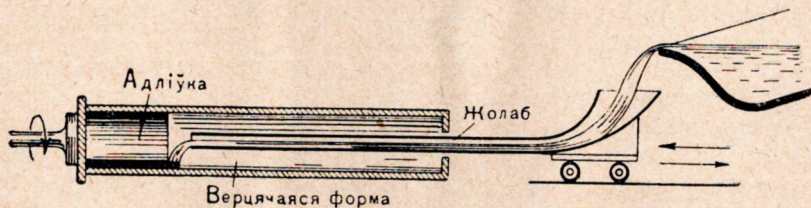


Рис. 178. Схема адцэнтрабегнага ліцця.

Другую апоку запаўняюць фармовачнай сумессю і ўшчыльняюць гэтак жа, як і першую. Затым здымаюць верхнюю апоку, вымаюць мадэль стаяка і на плоскасці раз'ёму формы праразаюць каналы *E*, якія злучаюць стаяк з будучай поласцю формы. Пасля гэтага вымаюць мадэль з формы (рыс. 176, *г*). Затым ніжнюю палавіну формы накрываюць верхняй (рыс. 176, *д*). Верхняя апока змацоўваецца з ніжняй, на форму накладваюць груз і праз адтуліну *K* форму заліваюць металам. На рыс. 176, *е* паказана адліўка з астаткам металу *M*, застыўшага ў стаяку; апошні потым адсякаецца.

Для павелічэння трываласці і газаванікальнасці формы перад запаўненнем іх металам прасушваюцца на паветры або ў спецыяльных сушыльных печах.

На рис. 177 паказана схема ліцця пад ціскам. Расплаўлены метал, нагнятаемы спецыяльнай машынай, паступае ў металічную (сталёвую) форму пад ціскам ад 5 да 60 ат. Метал пры гэтым добра запаўняе форму, дакладна ўзнаўляючы яе канфігурацыю. Ліццё пад ціскам прымяняецца ў масавай вытворчасці для каляровых сплаваў з менш высокай тэмпературай плаўлення.

На рис. 178 паказана схема адцэнтрабежнага ліцця.

Пры адцэнтрабежным ліцці форма, запоўненая вадкім металам, хутка верціцца; пры гэтым метал шчыльна залівае ўсе выгіны і паглыбленні формы. Паколькі дзеянне сіл, узнікаючых пры вярчэнні, выклікае расслойванне рэчываў па іх шчыльнасці, то газы, якія знаходзяцца ў метале, як больш лёгкія, выдзяляюцца ва ўнутраную поласць; гэта робіць адліўку свабоднай ад шкодных газавых ракавін.

108. Сплавы і іх прымяненне ў тэхніцы. Расплаўленыя металы можна змешваць адзін з другім. Пасля зацвердзявання гэтых сумесей атрымліваюцца сплавы.

Сплавы шырока прымяняюцца ў тэхніцы. Усім добра вядома сталь, якая з'яўляецца сплавам жалеза з вугляродам.

Фізічныя ўласцівасці сплаваў адрозніваюцца ад фізічных уласцівасцей іх састаўных частак. Сплаў звычайна бывае больш цвёрдым і трывалым, чым яго састаўныя часткі.

Спецыяльныя сарты сталі складаюцца са сплаву жалеза і вугляроду з прымессю некаторых рэдкіх металаў: хрому, нікелю, ванадыю, малібдэну.

Адны з гэтых сплаваў маюць вялікую трываласць, другія — цвёрдасць або асабліваю пругкасць. Нержавеючая сталь, напрыклад, вельмі стойкая ў хімічных адносінах, не ўступае ў хімічныя рэакцыі нават пры судакрананні з кіслотамі.

Да ліку трывалых сплаваў належаць сплавы алюмінію з іншымі металамі. Асабліваю трываласць, напрыклад, мае дзюралюміній, які складаецца з 94% алюмінію, 5% медзі, 0,5% магнію, 0,5% марганцу. Тэмпература плаўлення яго 650°C. Удзельная вага дзюралюмінію ў тры разы меншая за ўдзельную вагу сталі, а супраціўленне на разрыв такое ж, як у лепшых сартоў сталі. Падобныя ўласцівасці мае кальчугалюміній. Такія сплавы ідуць на вырабы, у якіх трэба спалучаць лёгкасць з трываласцю: напрыклад, на асобныя часткі аўтамабіляў, самалётаў.

Прымяненнем алюмінію і яго сплаваў пры вырабе адказных частак корпуса судна і суднавога рухавіка ўдаецца значна паменшыць вагу суднаў, што дае магчымасць павялічыць іх танаж. З кожным годам пашыраецца прымяненне алюмінію і яго сплаваў у разнастайных галінах вытворчасці.

Тэмпература плаўлення сплаваў звычайна бывае ніжэйшая за тэмпературу плаўлення іх галоўных састаўных частак.

Можна атрымаць сплаў з вельмі нізкай тэмпературай плаўлення. Так, напрыклад, сплаў, які складаецца з двух частак вісмуту ($t_{пл} = 271^\circ\text{C}$), адной часткі волава ($t_{пл} = 232^\circ\text{C}$) і адной часткі свінцу ($t_{пл} = 327^\circ\text{C}$), плавіцца ўжо пры 95°C. Чайная лыжка, зробленая

з такога сплаву, расплавіцца ў кіпячай вадзе. З такіх сплаваў вырабляюць лёгкаплаўкія засцерагальныя пробкі ў клапанах паравых катлоў. Калі ўзровень вады ў катле панізіцца ніжэй нормы, пробкі аказваюцца вышэй узроўню вады, хутка перагравваюцца і плавяцца. У выніку пара з катла атрымлівае свабодны выхад у топку, тушыць яе, і, такім чынам, выключаецца магчымасць выбуху катла.

Лёгкаплаўкія сплавы прымяняюцца таксама ў многіх засцерагальных проціпажарных прыстасаваннях.

Шырока прымяняемы на практыцы прыпой для пайкі розных вырабаў з металу складаецца з дзвюх частак свінцу і адной часткі волава. Тэмпература плаўлення яго 180°C , г. зн. значна ніжэйшая за тэмпературу плаўлення волава і свінцу.

Лёгкаплаўкія сплавы, так званыя бабіты, прымяняюцца для заліўкі падшыпнікаў. Бабітам заліты, напрыклад, падшыпнікі, у якіх верцяцца валы матораў аўтамабіляў і трактараў. Калі па якой-небудзь прычыне смазка акажацца недастатковай, то з прычыны нагрывання пры трэнні вала аб падшыпнік расплавіцца бабітавы ўкладыш падшыпніка, а вал захаваецца.

Практыкаванне 30.

1. Якая колькасць цеплыні спатрэбіцца для ператварэння 10 кг лёду ў ваду пры 0°C ?
2. Якая колькасць цеплыні спатрэбіцца для ператварэння 150 кг лёду з тэмпературай -8°C у ваду пры тэмпературы 0°C ?
3. Разлічыць колькасць цеплыні, якая патрэбна для ператварэння 20 кг лёду пры -4°C у ваду пры 100°C .
4. У слоіку змяшчаецца 2 кг вады пры тэмпературы 18°C . Якую колькасць цеплыні аддае вада ахаладжальнай сумесі, у якую апушчан слоік, калі ўся вада ў слоіку ператвараецца ў лёд з тэмпературай 0°C ?
5. У медны каларыметр вагою ў 200 г наліта 100 г вады пры 16°C . У ваду кінулі кавалачак лёду пры 0°C вагою 9,3 г, які цалкам расплавіўся. Канчатковая тэмпература вады пасля гэтага ўстанавілася ў 9°C . Вызначыць на аснове гэтых даных удзельную цеплыню плаўлення лёду.
6. Якая колькасць цеплыні патрэбна для расплаўлення 1 кг жалеза, узятага пры тэмпературы 20°C ?

109. Выпарэнне. Малекулы вадкасці знаходзяцца ў бесперапынным руху. Велічыня сярэдняй кінетычнай энергіі іх адпавядае тэмпературы вадкасці. Бязладна рухаючыся, малекулы сутыкаюцца адна з другой, у выніку чаго частка з іх набывае энергію, большую за іх сярэднюю кінетычную энергію. Атрымаўшы лішкавую энергію, дастатковую для пераадолення сіл малекулярнага сцяплення, і аказаўшыся блізка да паверхневага слоя вадкасці, такія малекулы могуць вылецець з вадкасці. Сукупнасць малекул, вылецеўшых з вадкасці, называюць парай дадзенай вадкасці, а самы працэс пераходу рэчыва з вадкага стану ў газападобны называецца парайтварэннем.

Парайтварэнне, якое адбываецца пры любых тэмпературах з адкрытай паверхні вадкасці, называецца выпарэннем.

Выпараюцца не толькі вадкасці, але і цвёрдыя целы, напрыклад нафталін і камфара. Выпараецца і лёд. Гэтым тлумачыцца высыханне мокрай бялізны на морозе. Выпарэнне цвёрдых цел называецца вазгонкай, або сублімацыяй.

110. Ахаладжэнне пры выпарэнні. Пры ператварэнні вадкасці ў пару малекулы вадкасці, пераадолюваючы сілы счаплення ў паверхневым слоі, выконваюць работу. Паколькі з вадкасці вылятаюць малекулы, якія маюць вялікую скорасць, то сярэдняя скорасць малекул вадкасці, што засталіся, памяншаецца, памяншаецца іх кінетычная энергія. Таму, **калі няма прытоку энергіі да вадкасці звонку, выпарэнне вядзе да памяншэння ўнутранай энергіі вадкасці, у выніку чаго вадкасць ахалоджваецца.**

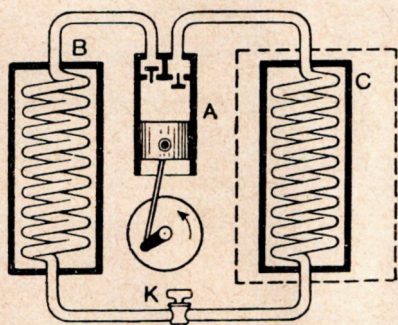


Рис. 178а. Схема будовы кампрэсійнага халадзільніка.

Ахаладжэнне вадкасці пры выпарэнні лёгка назіраць, абгарнуўшы кісяёй або ватай шарык тэрмометра і паліўшы яго эфірам. Эфір, які хутка выпараецца, адаймае частку ўнутранай энергіі ад шарыка тэрмометра, у выніку чаго тэмпература апошняга значна паніжаецца. Калі наліць на драўляную падстаўку тонкі слой вады і паставіць на яго шклянку з эфірам, то эфір пры абдзіманні паветрам хутка выпараецца і тэмпература настолькі паніжаецца, што шклянка прымярзае да падстаўкі.

З'ява ахаладжэння пры выпарэнні вадкасці шырока выкарыстоўваецца ў практыцы. Пры перавозцы прадуктаў, якія хутка псуюцца, для ахаладжэння вагонаў у спецыяльных прыстасаваннях выпараюць вадкі аміяк або вадкі двухвокіс вугляроду.

Для атрымання лёду ў халадзільных устаноўках выпараецца вадкі аміяк у змеевіках, якія праходзяць праз раствор солі і ахалоджваюць яго ніжэй 0°C . У раствор солі змяшчаюць формы з ліставой сталі, напоўненыя вадой; у гэтых формах, якія абмываюцца ахалоджаным расолам, і ўтвараюцца блокі лёду.

У цяперашні час шырокае прымяненне ў быту атрымалі электрычныя халадзільнікі. Разгледзім прынцып дзеяння кампрэсійнага халадзільніка (рис. 178а). Гэты халадзільнік складаецца з трох асноўных частак: кампрэсара А, кандэнсатара В і выпаральніка С.

У змеевіку-кандэнсатары пры дапамозе кампрэсара А сціскаюць якое-небудзь рэчыва, якое лёгка пераходзіць з газападобнага стану ў вадкі і з вадкага стану ў газападобны. У якасці такіх рэчываў (якія называюцца ў тэхніцы халадзільнымі агентамі) прымяняюцца: аміяк, фрэон-12 (дыфтордыхлорметан — CF_2Cl_2), сярністы ангідрыд і інш.

Пры сцісканні халадзільны агент ператвараецца з газападобнага стану ў вадкі. Адначасова з гэтым кампрэсар стварае ў змеевіку-выпаральніку С разрэджанне. Тады праз рэгулюючы вентыль К накіроўваецца вадкі халадзільны агент, які хутка там выпараецца. Выпарэнне суправаджаецца паглынанням энергіі ад сценак змеевіка С, паветра, якое сулакраецца з ім, і далей ад прадуктаў, якія знаходзяцца ў халадзільнай камеры. У выніку гэтага ў халадзільнай камеры зніжаецца тэмпература і прадукты ахалоджваюцца.

Кампрэсар прыводзіцца ў дзеянне электрарухавіком.

У гарачых краінах ваду звычайна трымаюць у порыстых гліняных сасудах. Вада, якая прасочваецца праз поры сасуда, выпараецца, у выніку чаго астатняя вада ў сасудзе застаецца халоднай.

111. Насычаючая пара. Дзякуючы ўласнаму цеплавому руху, а таксама руху паветра, вылецеўшыя з вадкасці малекулы паступова рассяваюцца ў акружаючай прасторы. У выніку гэтага выпарэнне з адкрытай паверхні вадкасці адбываецца да таго часу, пакуль уся вадкасць не выпарыцца.

Уявім сабе цяпер, што вадкасць знаходзіцца ў закрытым сасудзе. У такім сасудзе адначасова з працэсам параўтварэння адбываецца і адваротны працэс — ператварэнне пары ў вадкасць. Частка малекул пары, у выніку цеплага руху наблізіўшыся да паверхні вадкасці, вяртаецца ў вадкасць. Аднак спачатку лік малекул, якія пакідаюць вадкасць, будзе большы, чым лік малекул, якія вяртаюцца зноў у вадкасць. Таму шчыльнасць пары ў сасудзе будзе паступова павялічвацца. З павелічэннем шчыльнасці пары павялічыцца і лік малекул яе, якія пападаюць зноў у вадкасць. Нарэшце, надыйдзе такі момант, пачынаючы з якога лік малекул, вылятаючых з вадкасці ў адзінку часу, акажацца роўным ліку малекул, якія вяртаюцца назад у вадкасць. З гэтага моманту лік малекул пары над вадкасцю робіцца пастаянным. Надыходзіць так званая дынамічная (рухомая) раўнавага паміж парай і вадкасцю. ***Пара, якая знаходзіцца ў дынамічнай раўнавазе са сваёй вадкасцю, называецца насычаючай парай.***

112. Ціск насычаючай пары. У замкнутым сасудзе, які змяшчае вадкасць, паміж вадкасцю і парай, як мы ведаем, устаўляецца стан рухомай раўнавагі. Пры павышэнні тэмпературы павялічваецца колькасць малекул вадкасці, якія набываюць энергію, дастатковую для вылету з вадкасці. Скорасць выпарэння вадкасці пры гэтым узрастае, раўнавага паміж парай і вадкасцю парушаецца, і колькасць пары над вадкасцю павялічваецца. Гэта прыводзіць да павелічэння шчыльнасці і ціску насычаючай пары.

Такім чынам, ***ціск насычаючай пары ўзрастае з павелічэннем яе тэмпературы.***

Ціск насычаючай пары дадзеных вадкасцей пры аднолькавай тэмпературы залежыць ад роду гэтых вадкасцей. Гэтую залежнасць можна паказаць на наступным доследзе. У сасуд з ртуцю апускаюць некалькі бараметрычных трубак, напоўненых ртуцю (рыс. 179). Трубка *a* служыць барометрам. У трубку *b* уводзяць піпеткай ваду, частка якой хутка выпараецца ў «тарычэлівай пустаце», а частка застаецца ў выглядзе вадкасці над ртуцю (прыкмета таго, што над ртуцю

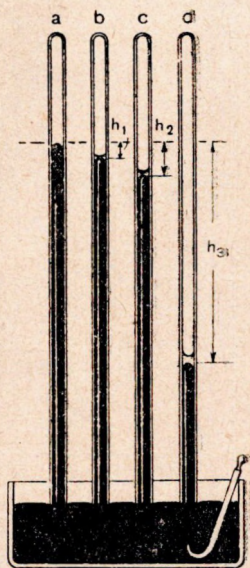


Рис. 179. Прибор для измерения давления насыщающей пары воды, спирту и эфиру.

знаходзіцца насычаючая вадзяная пара). У трубку *c* уводзяць спірт і ў трубку *d* — эфір. Паколькі ціск насычаючай пары ртуці ў «тарычэлавай пустаце» мізэрны, то рознасць паміж вышынямі ртуці ў барометры і ў кожнай з астатніх трох трубак пакажа ціск насычаючай пары дадзенай вадкасці.

Найбольшы ціск, як паказвае дослед, мае пара эфіру, меншы — пара спірту і яшчэ меншы — пара вады. Пры тэмпературы 20°C пругкасць насычаючай пары гэтых рэчываў выражаецца наступнымі лічбамі (у мм рт. сл.):

Вада	$h_1 = 17,5$
Спірт	$h_2 = 44,5$
Эфір	$h_3 = 437$

113. Незалежнасць ціску і шчыльнасці насычаючай пары ад яе аб'ёму. Нальём у глыбокі сасуд *A* ртуці і апусцім у яго доўгую напоўненую ртуццю трубку *B*. На рыс. 180 паказана верхняя частка гэтага прыбора ў трох становішчах.

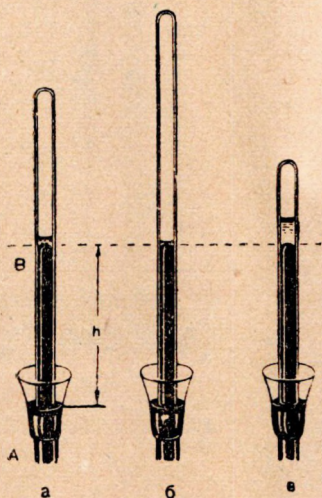


Рис. 180. У трох розных становішчах трубка ртуць застаецца на адным узроўні.

Увядзём унутр трубка *B* столькі эфіру, каб частка яго пры гэтым выпарылася, а частка засталася на паверхні ртуці ў выглядзе вадкасці. У прасторы над вадкім эфірам знаходзіцца насычаючая пара, ціск якой ровен $H - h$, дзе H — ціск атмасферы, а h — вышыня слупа ртуці ў трубе¹. Тэмпература прыбора на працягу ўсяго доследу падтрымліваецца пастаяннай.

Падымем цяпер трубку *B* уверх. Гэтым мы павялічым аб'ём, займаемы парай. Шчыльнасць пары ў першы момант паменшыцца. Але пры гэтым зараз жа парушыцца рухомая раўнавага паміж парай і вадкасцю. Лік малекул пары, якія вяртаюцца ў вадкасць, акажацца меншым за лік малекул, якія вылітаюць з вадкасці. Вадкасць будзе

выпарацца да таго часу, пакуль шчыльнасць пары не дасягне ранейшай велічыні. Вышыня слупа ртуці застанеца ранейшай, значыць, ціск пары эфіру пры павелічэнні яго аб'ёму не змяняецца, колькасць жа вадкага эфіру над ртуццю памяншаецца (рыс. 180, б).

Апусцім цяпер трубку ўглыб сасуда; гэтым мы, паменшым аб'ём, які займае пара, у выніку чаго ў першы момант павялічыцца яе шчыльнасць і слупок ртуці злёгка апусціцца. Рухомая раўнавага пары і вадкасці пры гэтым парушыцца, у выніку чаго частка пары прыойдзе ў вадкасць. Слупок вадкага эфіру над ртуццю павялічыцца,

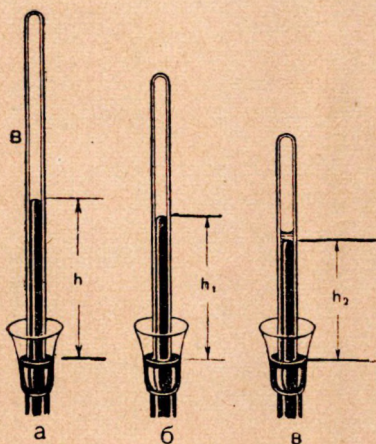
¹ Вагу слупка вадкага эфіру можна не ўлічваць, бо яна вельмі малая ў параўнанні з вагой слупа ртуці.

вышыня ж слупа ртуті акажацца зноў ранейшай, г. зн. ціск пары эфіру не зменіцца (рыс. 180, в).

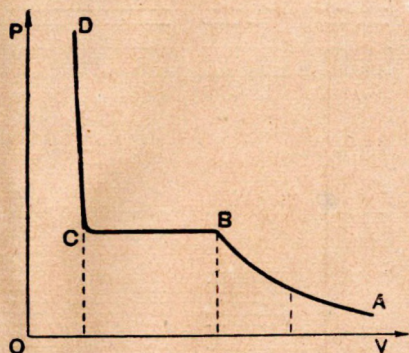
Шчыльнасць і ціск насычаючай пары ў прысутнасці вадкасці не змяняюцца ні пры памяншэнні, ні пры павелічэнні аб'ёму, займаемага насычаючай парай, калі толькі тэмпература вадкасці і пары застаецца пастаяннай.

Ціск насычаючай пары дадзенай вадкасці пры дадзенай тэмпературы ёсць велічыня пастаянная; яна змяняецца толькі са змяненнем тэмпературы.

114. Ненасычаючая пара. Калі ў прасторы, якая змяшчае пару якой-небудзь вадкасці, можа адбывацца далейшае выпарэнне гэтай вадкасці, то пара, якая знаходзіцца ў гэтай прасторы, называецца ненасычаючай парай.



Рыс. 181. Дэманстрацыя пераходу ненасычаючай пары ў насычаючую.



Рыс. 182. Графік ператварэння ненасычаючай пары ў вадкасць.

Змяняючы аб'ём ненасычаючай пары, мы заўважым, што ціск яе таксама змяняецца: пры памяншэнні аб'ёму ціск павялічваецца, а пры павелічэнні аб'ёму ціск памяншаецца.

Няхай трубка B паднята так высока, што ў ёй знаходзіцца ненасычаючая пара (рыс. 181, а). Ціск гэтай пары роўн $H - h$, дзе H — атмасферны ціск. Калі пасля гэтага апускаць трубку, то ўзровень ртуті ў ёй будзе паніжацца: $h_1 < h$ (рыс. 181, б), а гэта паказвае, што ціск пары ўзрастае ($H - h_1 > H - h$). Ціск пары будзе ўзрастаць да таго часу, пакуль пара не стане насычаючай. Над ртутцю пры гэтым паявіцца вадкасць (рыс. 181, в). З моманту насычэння пары яе ціск стане пастаянным і роўным $H - h_2$. Гэта будзе найбольшы ціск пары пры дадзенай тэмпературы.

Найбольшы ціск пры дадзенай тэмпературы мае пара ў стане насычэння.

Апускаючы далей трубку *B*, мы, нарэшце, атрымаем над ртуццю вадкасць, аб'ём якой нават пры вельмі вялікіх цісках памяншаецца вельмі нязначна.

Графічна пераход ненасычаючай пары ў вадкасць шляхам памяншэння яе аб'ёму без змянення тэмпературы паказваецца крывой *ABCD* (рыс. 182). Частка *AB* гэтай крывой адпавядае ненасычаючай пары, пункт *B* — стану насычэння, лінія *BC* — кандэнсацыі пары ў вадкасць і *CD* — вадкасці. Крывая *ABCD* называецца іза тэрмай пары і вадкасці.

Ненасычаючую пару можна прывесці ў стан насычэння не толькі шляхам памяншэння аб'ёму, але і шляхам паніжэння яе тэмпературы.

Так, напрыклад, калі паліць эфірам знадворную частку трубки *B* (рыс. 181, *a*), то эфір, які выпараецца, ахалодзіць яе, у выніку чаго ненасычаючая пара праройдзе ў стан насычэння, часткова ператварыўшыся пры гэтым у вадкасць.

Гэтай уласцівасцю пары тлумачыцца пацэнне халодных прадметаў, унесеныя ў цёплы пакой, утварэнне туману, расы і г. д. Такім чынам, пераход пары з ненасычаючага ў насычаючы стан дасягаецца двума шляхамі: 1) паніжэннем тэмпературы і 2) павышэннем ціску (памяншэннем аб'ёму).

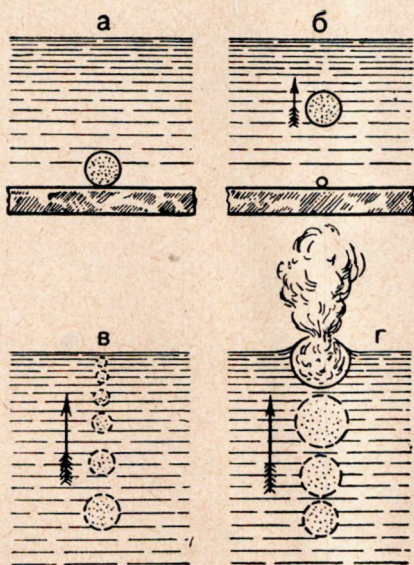
Пераход назад з насычаючага ў ненасычаючы стан дасягаецца: 1) без змянення тэмпературы памяншэннем ціску (павелічэннем аб'ёму) і 2) павышэннем тэмпературы пары.

Калі асцярожна награвать трубку, што змяшчае насычаючую пару (рыс. 180), то вадкасць, якая знаходзіцца над ртуццю, паступова выпарыцца, і пры далейшым награванні над ртуццю будзе ўжо ненасычаючая пара.

У тэхніцы ненасычаючая пара, атрымліваемая шляхам перагрэву насычаючай пары, называецца перагрэтай парай. Для работы паравых рухавікоў у наш час прымяняюць выключна перагрэтую пару, якая мае тэмпературу ад 150° да 550°С.

115. Кіпенне. Будзем награвать ваду ў колбе, сочачы за яе тэмпературай і з'явамі, якія ў ёй адбываюцца.

Раней за ўсё заўважаем паяўленне ўнутры вадкасці невялікіх пузыркоў газу. Паяўленне гэтых пузыркоў тлумачыцца выдзяленнем



Рыс. 183. *a* — рост пузырька паветра ў выніку выпарэння ў яго вадкасці; *б* — адрыў пузырька і зародак наступнага; *в* — падняцце пузырька; *г* — кіпенне вадкасці.

паветра, абсарбіраванага (паглынутага) сценкамі сасуда і вадой. Паколькі ўнутры кожнага пазырка адбываецца выпарэнне вады, то, акрамя паветра, пазыркi змяшчаюць насычаючую пару вады.

Пры далейшым награванні вады пазыркi паветра з парай павялічваюцца ў размеры і робяцца больш шматлікімі. На рыс. 183 паказаны паслядоўныя стадыі росту аднаго з пазыркоў. Дасягнуўшы пэўнай велічыні (рыс. 183, а), пазырок адрываецца (рыс. 183, б) ад сценак сасуда.

Пазыркi, якія падымаюцца, трапляючы ў верхнія, больш халодныя слаі вады, памяншаюцца ў размерах, паколькі пара, што ў іх змяшчаецца, кандэнсуецца і застаецца толькі вельмі малая колькасць паветра, якое і выходзіць на паверхню (рыс. 183, в).

Калі ўся вадкасць дастаткова прагрэлася, пазыркi ўжо не прападаюць у верхніх слаях, але, падымаючыся, працягваюць расці і лопаюцца на паверхні вадкасці, выкідваючы пару, якая ў іх змяшчаецца (рыс. 183, г).

Параўтварэнне, якое адбываецца адначасова ўнутры і з паверхні вадкасці, называецца кіпеннем.

Відавочна, што пры кіпенні ціск насычаючай пары ўнутры пазыркоў такі, што ён можа пераадолець знешні атмасферны ціск, і пара з пазыркоў вырываецца вонкі. Гэта значыць, што **кіпенне адбываецца пры такой тэмпературы, пры якой ціск насычаючай пары вадкасці ровен знешняму ціску на свабодную паверхню вадкасці.**

Адсюль вынікае, што пры памяншэнні ціску на вадкасць тэмпература яе кіпення павінна паніжацца, а пры павелічэнні ціску — павышацца. Дослед пацвярджае гэты вывад.

Памесцім пад каўпак паветранага насоса шклянку з халоднай вадой. Мы заўважым, што пры дасягненні ў каўпаку пэўнага раз'яджання халодная вада бурна закіпае.

Калі паставіць пад каўпак насоса шкелца гадзінніка з кропляй вады і разрадзіць паветра ў каўпаку, то вада спачатку закіпіць, а потым замерзне. Чаму? Справа ў тым, што на выпарэнне і кіпенне затрачваецца ўнутраная энергія вады; у выніку гэтага тэмпература кроплі вады паніжаецца да 0°С, і яна замярзае.

Як вядома, ціск паветра памяншаецца з павелічэннем вышыні над узроўнем мора. Значыць, з падняццем уверх тэмпература кіпення вадкасці павінна памяншацца. Гэта пацвярджаецца доследам. На рыс. 184 графічна паказана змяненне тэмпературы кіпення вады ў залежнасці ад вышыні над узроўнем мора.

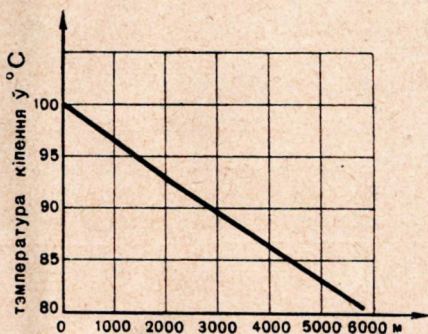


Рис. 184. Графік паніжэння тэмпературы кіпення вады з павелічэннем вышыні над узроўнем мора.

Тэмпература кіпення залежыць ад роду вадкасці. Напрыклад, пры атмасферным ціску ртуць кіпіць пры 357°C, карасін — пры 170—260°C (у залежнасці ад сорту), спірт — пры 78°C, эфір — пры 35°C, вадкі аміак — пры 33,4 С.

Тэмпература кіпення дадзенай вадкасці залежыць не толькі ад знешняга ціску, але і ад тых прымесей, якія знаходзяцца ў ёй.

Як правіла, наяўнасць у вадкасці растваранага цвёрдага рэчыва павышае тэмпературу яе кіпення. Так, напрыклад, вада, якая змяшчае 12% спажывоўнай солі, кіпіць пры 102°C. Калі ж павысіць канцэнтрацыю раствору прыкладна да 40%, то тэмпература кіпення ўзрасце да 108°C.

116. Удзельная цеплыня параўтварэння. Колькасць цеплыні, якая неабходна для ператварэння адзінкі масы вадкасці пры тэмпературы кіпення ў пару, называецца ўдзельнай цеплынёй параўтварэння.

Удзельная цеплыня параўтварэння выражаецца ў $\frac{\text{кал}}{\text{г}}$ і $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

У наступнай табліцы паказаны велічыні ўдзельных цяплынь параўтварэння для некаторых вадкасцей пры тэмпературы кіпення гэтых вадкасцей пад атмасферным ціскам:

Рэчыва	Удзельная цеплыня параўтварэння (у $\frac{\text{кал}}{\text{г}}$)	Рэчыва	Удзельная цеплыня параўтварэння (у $\frac{\text{кал}}{\text{г}}$)
Вада	539	Эфір	84
Аміак	327	Серавуглярод . .	84
Спірт	204	Шкіпідар	70
Бензін	95	Ртуць	69

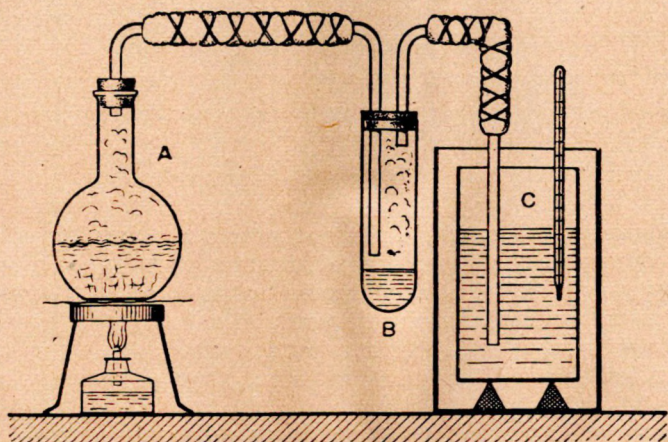
Для адной і той жа вадкасці ўдзельная цеплыня параўтварэння пры розных тэмпературах мае рознае значэнне. Гэта відаць з наступнай табліцы для вады:

Тэмпература	0°	50°	100°	150°	200°	250°	300°	350°	374°
Удзельная цеплыня параўтварэння (у $\frac{\text{кал}}{\text{г}}$)	595	568	539	506	468	408	330	210	0

З табліцы відаць, што ўдзельная цеплыня параўтварэння памяншаецца з павышэннем тэмпературы вадкасці.

Цеплыня параўтварэння выдзяляецца, калі пара кандэнсуецца ў вадкасць. На гэтым заснавана доследнае вызначэнне ўдзельнай цеплыні параўтварэння. Устаноўка для такога доследу паказана на рыс. 185.

Пара з колбы *A* праз пробірку *B* паступае ў каларыметр *C* з вадой, дзе кандэнсуецца, награвваючы пры гэтым ваду. Абазначым масу вады ў каларыметры да ўпускання ў яе пары праз *m*, масу каларыметра з мяшалкай *m*₁, удзельную цеплаёмкасць вады *c*, удзельную цеплаёмкасць каларыметра *c*₁, пачатковую тэмпературу вады і каларыметра *t*₁, масу прапушчанай у вадку каларыметра пары *m*₂ (знаходзіцца па рознасці масы вады ў каларыметры да і пасля прапускання ў яе пары), тэмпературу кіпення вады *t*₂, канчатковую тэмпературу вады ў каларыметры *θ*, шукаемую ўдзельную цеплыню параўтварэння вады *L*.



Рыс. 185. Устаноўка для вызначэння ўдзельнай цеплыні параўтварэння вады.

Колькасць цеплыні, атрыманая вадой і каларыметрам пры прапусканні пары:

$$Q = cm(\theta - t_1) + c_1 m_1(\theta - t_1). \quad (1)$$

Колькасць цеплыні, аддадзеная парай пры кандэнсцыі яе ў вадкасць, роўна *m*₂*L*. Пры далейшым ахаладжэнні атрыманай вадкасці ад тэмпературы кандэнсцыі да канчатковай тэмпературы выдзеліцца колькасць цеплыні: *cm*₂(*t*₂ − *θ*).

Усяго выдзяляецца цеплыні:

$$Q = Lm_2 + cm_2(t_2 - \theta). \quad (2)$$

Прыраўніваючы правыя часткі роўнасці (1) і (2), складаем ураўненне цеплавога балансу:

$$cm(\theta - t_1) + c_1 m_1(\theta - t_1) = Lm_2 + cm_2(t_2 - \theta).$$

Адсюль атрымліваем формулу для вылічэння велічыні *L*:

$$L = \frac{1}{m_2} [cm(\theta - t_1) + c_1 m_1(\theta - t_1) - cm_2(t_2 - \theta)].$$

Практыкаванне 31.

1. Вызначыць колькасць цеплыні, патрэбную для ператварэння 1 кг вады, узятай пры 0°C , у пару пры 100°C .

2. Колькі цеплыні выдзеліцца пры кандэнсцыі 100 г вадзяной пары, якая мае тэмпературу 100°C , і пры ахаладжэнні атрыманай вады да 20°C ?

3. Удзельная цеплыня параўтварэння ў вады большая, чым у эфіра. Чаму ж эфір, калі ім змячыць руку, мацней астуджае яе, чым вада, у такіх выпадках?

4. У сасуд, які змяшчае 30 кг вады пры 0°C , уводзіцца 1,85 кг вадзяной пары, якая мае тэмпературу 100°C , у выніку чаго тэмпература вады робіцца роўнай 37°C . Знайсці ўдзельную цеплыню параўтварэння вады?

5. Якая колькасць цеплыні неабходна, каб ператварыць 1 кг лёду пры 0°C у пару пры 100°C ?

6. Якая колькасць цеплыні неабходна для таго, каб 5 кг лёду пры -10°C ператварыць у пару пры 100°C і затым нагрэць пару да 150°C пры нармальным ціску?

Удзельная цеплаёмкасць вадзяной пары пры пастаянным ціску роўна $0,49 \frac{\text{кал}}{\text{г. град.}}$.

7. Колькі кілаграмаў каменнага вугалю патрэбна спаліць для таго, каб ператварыць у пару 100 кг лёду, узятага пры 0°C ? Каэфіцыент карыснага дзеяння топкі 70%. Цеплатворная здольнасць вугалю $7000 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$.

117. Вільготнасць паветра. Акружаючае нас атмасфернае паветра ў выніку бесперапыннага выпарэння вады з паверхні вадаёмаў і раслінных покрываў заўсёды мае ў сабе вадзяную пару. Чым больш вадзяной пары знаходзіцца ў пэўным аб'ёме паветра, тым бліжэй пара да стану насычэння. З другога боку, чым вышэйшая тэмпература паветра, тым большая колькасць вадзяной пары патрэбна для яго насычэння.

У залежнасці ад колькасці пары, якая знаходзіцца пры дадзенай тэмпературы ў атмасферы, паветра бывае рознай ступені вільготнасці. Вызначэнне вільготнасці мае вялікае значэнне пры даследаванні розных з'яў у атмасферы, для некаторых відаў вытворчасці, захавання гігіены і г. д.

Велічыня, вымяраемая колькасцю вадзяной пары (у грамах), якая змяшчаецца ў 1 м^3 паветра, называецца абсалютнай вільготнасцю паветра¹.

Ведаючы абсалютную вільготнасць паветра, мы яшчэ не можам вызначыць, наколькі сухім або вільготным з'яўляецца паветра. Неабходна пры гэтым улічваць і тэмпературу паветра. Калі тэмпература нізкая, то дадзеная колькасць вадзяной пары ў паветры можа аказацца вельмі блізкай да насычэння, г. зн. паветра будзе сырэм. Пры больш высокай тэмпературы тая ж колькасць вадзяной пары далёкая ад насычэння, паветра — сухое.

Для меркавання аб ступені вільготнасці паветра важна ведаць, наколькі блізка ці далёка ад стану насычэння вадзяная пара, якая знаходзіцца ў паветры. Для гэтага ўводзяць паняцце адноснай вільготнасці.

¹ У метэаралогіі прынята называць абсалютнай вільготнасцю ціск вадзяной пары, што змяшчаецца ў паветры, вымераны ў міліметрах ртутнага слупа.

Адноснай вільготнасцю паветра называецца адносіна абсалютнай вільготнасці да той колькасці пары, якая неабходна для насычэння 1 м^3 паветра пры дадзенай тэмпературы.

Малекулы вадзяной пары трымаюць сябе гэтак жа, як малекулы газу, таму для пары мае месца тая ж залежнасць паміж шчыльнасцю і ціскам, якая ўстаноўлена для газу ў § 85. На гэтай падставе мы можам вызначыць адносную вільготнасць як *адносіну ціску вадзяной пары, што змяшчаецца ў паветры, да ціску вадзяной пары, якая насычае паветра пры той жа тэмпературы.*

Калі D_0 — колькасць пары, патрэбная для насычэння паветра, D — фактычная колькасць пары ў паветры, то адносная вільготнасць f пры дадзенай тэмпературы будзе роўна:

$$f = \frac{D}{D_0}.$$

Такім чынам, каб вызначыць адносную вільготнасць паветра, трэба абсалютную вільготнасць падзяліць на колькасць пары, неабходнай для насычэння 1 м^3 паветра пры дадзенай тэмпературы.

Паколькі велічыня D_0 — найбольшая пры дадзенай тэмпературы, то адносная вільготнасць — заўсёды правільны дроб. Гэтую вільготнасць звычайна выражаюць у працэнтах:

$$f = \frac{D}{D_0} \cdot 100\%.$$

Нармальнай вільготнасцю жылых памяшканняў лічаць 60 — 70%.

118. Спосабы вызначэння вільготнасці паветра. Калі вільготнае паветра ахалоджваць, то пры некаторай тэмпературы ў ім выявіцца насычаючая вадзяная пара, якая пры далейшым ахаладжэнні пачне кандэнсавацца ў выглядзе расы.

Тэмпература, пры якой вадзяная пара ў паветры робіцца насычаючай, называецца пунктам расы.

Ведаючы тэмпературу паветра і вызначыўшы пункт расы, лёгка вылічыць яго вільготнасць. Так, напрыклад, калі пункт расы 8°C , а тэмпература паветра 15°C , то, карыстаючыся спецыяльнай табліцай (яна ёсць у задачніках і даведніках), знойдзем колькасць насычаючай вадзяной пары пры 8°C ; яна роўна $8,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$, гэта і будзе абсалютная вільготнасць паветра. Вызначыўшы па той жа табліцы колькасць насычаючай пары пры 15°C (яна роўна $12,8 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$) і падзяліўшы на гэтую колькасць абсалютную вільготнасць, атрымаем адносную вільготнасць паветра. У дадзеным выпадку:

$$f = \frac{8,3}{12,8} \cdot 100 \approx 64\%.$$

119. Валосны гігromетр. Прыборы, якія служаць для вызначэння вільготнасці паветра, называюцца гігromетрамі. Канструкцыі іх могуць быць рознымі.

На рыс. 186 паказана схема будовы валоснага гігromетра. Аб'ястлушчаны чалавечы волас змяняе сваю даўжыню пры змяненні

вільготнасці: падаўжаецца пры павелічэнні вільготнасці і пакарочваецца пры памяншэнні.

Калі такі волас *C* абкруціць вакол лёгкага блока, прымацаваўшы адзін канец яго да металічнай рамкі, а да другога падвесіўшы груз *P*, то пры змяненні даўжыні воласа паказальнік *S*, прымацаваны да блока, будзе рухацца.

Праградуіраваўшы папярэдне прыбор, мы можам па ім непасрэдна вызначыць адносную вільготнасць.

Валосны гігromетр прымяняецца ў тых выпадках, калі ў вызначэнні вільготнасці паветра не патрэбна вялікая дакладнасць.

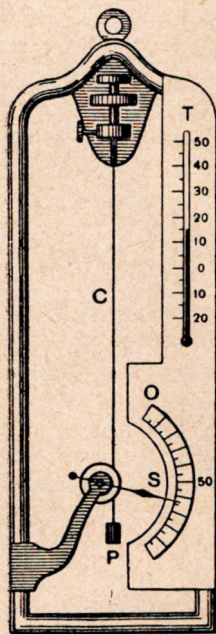


Рис. 186. Валосны гігromетр.

120. Псіхromетр¹ Аўгуста. Гэты прыбор складаецца з двух аднолькавых тэрмометраў *A* і *B* (рис. 187). Шарык тэрмометра *B* абгортваецца марляй *M*, канец якой апушчан у шклянку з вадой *C*. Вада са шклянкі па марлі падымаецца ўверх, таму марля заўсёды вільготная. Другі тэрмометр, шарык якога сухі, паказвае тэмпературу паветра. Калі паветра насычана вадзяной парай, то паказанні абодвух тэрмометраў аднолькавыя: абодва тэрмометры знаходзяцца ў аднолькавых умовах. Калі ж паветра не насычана парай, то з вільготнага тэрмометра выпараецца вада і тэмпература яго пры гэтым паніжаецца. Паніжэнне тэмпературы адбываецца да таго часу, пакуль змяншэнне ўнутранай энергіі, якое абумоўлена выпарэннем

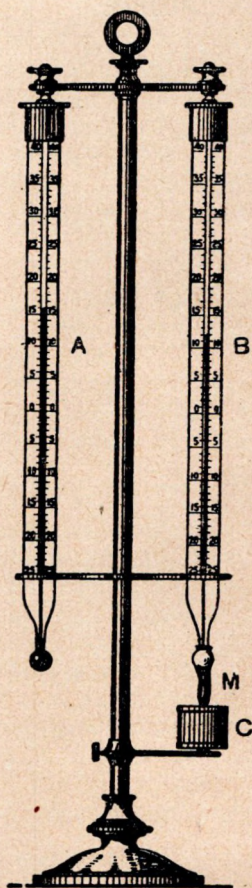


Рис. 187. Псіхromетр Аўгуста.

вады, не ўраўнаважыцца прытокам энергіі з акружаючай прасторы.

У звычайных умовах, такім чынам, паміж паказаннямі сухага і вільготнага тэрмометра будзе мець месца так званая псіхrameтрычная рознасць. Чым большая псіхrameтрычная рознасць, тым, відавочна, сушэйшае паветра, і, наадварот, чым яна меншая, тым большая адносная вільготнасць паветра.

¹ Псіхromетр — ад грэч. слоў: псіхрыа — холад і метро — мераю.

На падставе тэорыі, якую мы тут не разглядаем, складаюцца спецыяльныя псіхаметрычныя табліцы, карыстаючыся якімі, па паказаннях сухога і вільготнага тэрмометраў, можна хутка вызначыць адносную вільготнасць паветра.

Псіхаметрамі Аўгуста звычайна карыстаюцца ў тых выпадках, калі патрэбна асабліва дакладнае вызначэнне вільготнасці паветра. Вялікае значэнне мае вызначэнне вільготнасці паветра ў метэаралогіі для вывучэння з'яў, якія адбываюцца ў атмасферы, і для прадкавання надвор'я.

Практыкаванне 32.

1. Абсолютная вільготнасць паветра роўна $10 \frac{2}{мз}$. Знайсі адносную вільготнасць пры тэмпературы: 12° , 18° і 24°C .

2. Адносная вільготнасць у пакоі $f = 60\%$, тэмпература 16°C . Да якой тэмпературы трэба ахаладзіць бліскучы металічны прадмет, каб на яго паверхні з'явілася роса?

3. Сухі тэрмометр паказвае 20°C , а намочаны $15,5$. Знайсі адносную вільготнасць паветра.

4. Пры тэмпературы 10°C адносная вільготнасць паветра роўна 80% . Як зменіцца адносная вільготнасць, калі павысіць тэмпературу да 20°C ?

5. Сасуд змяшчае паветра пры $t = 15^\circ\text{C}$; адносная вільготнасць паветра $f = 63\%$. Калі паветра было асушана хлорыстым кальцыем, вага сасуда паменшылася на $3,243$ г. Вызначыць аб'ём сасуда.

121. Крытычная тэмпература. Ужо даўно ўзнікла думка, што, павялічваючы ціск і адначасова паніжаючы тэмпературу, можна давесці звычайныя газы, таксама як і ненасычающую пару, да стану насычаючай пары і ператварыць затым у вадкасць. Такім спосабам англійскі вучоны Фарадэй ператварыў у вадкасць рад газаў: аміяк, вуглякіслы газ, хлор і інш. Але такія газы, як кісларод, азот, вадарод, вокіс вугляроду, вокіс азоту і метан, не ператвараліся ў вадкасць нават пры сцісканні да 3000 ат і пры ахаладжэнні да -110°C . Трэба было высветліць прычыны гэтага з'явы.

Праблемай звадкавання газаў займаўся і вялікі рускі вучоны Д. І. Мендзелееў. У той час як яго папярэднікі ў сваіх разважаннях аб звадкаванні газаў зыходзілі з падабенства гэтага працэсу да працэсу ператварэння ненасычаючай пары ў вадкасць, Мендзелееў звярнуў увагу на ўмовы адваротнага працэсу — пераходу вадкасці ў пару.

Высветліўшы гэтыя ўмовы, Мендзелееў прыйшоў да вываду аб існаванні для кожнага рэчыва такой тэмпературы, пры якой знікае розніца паміж вадкім і газападобным станам гэтага рэчыва. Гэтую тэмпературу Мендзелееў назваў тэмпературай абсалютнага кіпення. Пазней яна стала называцца крытычнай тэмпературай.

Што гэта за тэмпература? Каб адказаць на гэтае пытанне, праробім наступны дослед.

Змесцім у паветраную ванну запаяную трубку, частка аб'ёму якой занята вадкасцю, а астатняя частка — насычаючай парай (рыс. 188), і будзем яе награваль. Пры награванні шчыльнасць вадкасці і шчыльнасць пары ў трубы будуць мяняцца. У якасці пры-

кладу пабудуем графікі змянення шчыльнасці вады і вадзяной пары ў залежнасці ад тэмпературы. Для гэтага па восі абсцыс будзем адкладваць тэмпературу, а па восі ардынат — шчыльнасці вадкасці і пары (рыс. 189, а).

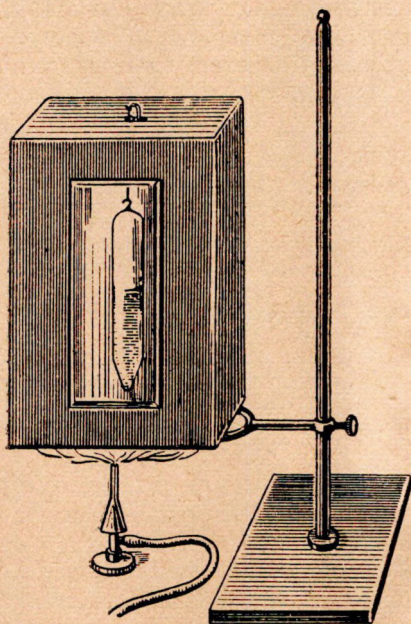


Рис. 188. Прибор для вивучэння крытычнага стану.

тура, пры якой адбываецца зліццё тэмпературай. Крытычнаму пункту K адпавядае асаблівы стан рэчыва, так званы крытычны, пры якім знікае ўсякая розніца паміж вадкасцю і яе насычаючай парай.

Паколькі вадкасць пры нагрыванні расшыраецца, то крывая CD , якая паказвае шчыльнасць вадкасці ў залежнасці ад тэмпературы, апускаецца, паказваючы на памяншэнне шчыльнасці вадкасці па меры павышэння тэмпературы.

А паколькі пры павышэнні тэмпературы вадкасць выпараецца, то шчыльнасць пары ўзрастае. Гэтае ўзрастанне шчыльнасці пары на графіку паказана крывой лініяй AB .

Крывая AB размяшчаецца ніжэй крывой CD , таму што пры ўсякай дадзенай тэмпературы шчыльнасць рэчыва ў парападобным стане меншая за шчыльнасць у вадкім стане.

Па меры павышэння тэмпературы шчыльнасць вадкасці памяншаецца, а шчыльнасць пары павялічваецца. Крывая CD будзе апускацца ўніз, а крывая AB падымацца ўверх. Абедзве крывыя зліваюцца ў некаторым пункце K (рыс. 189, б), які называецца крытычным пунктам, а тэмпера-

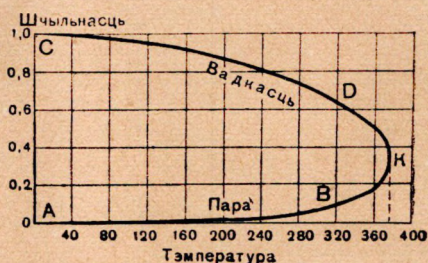
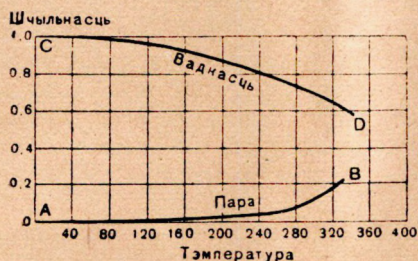


Рис. 189. Графік змянення шчыльнасці вады і пары пры нагрыванні.

Ціск і ўдзельны аб'ём рэчыва (аб'ём адзінкі масы) у крытычным стане называюцца таксама крытычнымі.

Першыя сістэматычныя работы па вызначэнню крытычных тэмператур розных рэчываў былі праведзены рускімі вучонымі М. П. Авенарыусам, А. І. Надзеждзіным і іншымі.

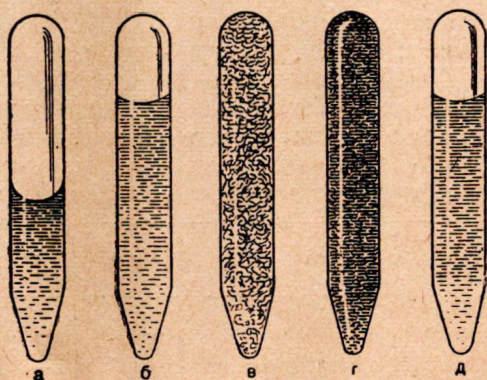
Крытычны стан эфіру Авенарыус вывучаў на прыборы, які паказан на рыс. 188. У трубачцы, змешчанай у паветраную ванну, эфір

знаходзіцца часткова ў вадкім, часткова ў парападобным стане. Пры пакаёвай тэмпературы абодва гэтыя станы рэзка размежаваны ўвагнутым меніскам вадкасці (эфір змочвае шкло) (рыс. 190, а).

Пры награванні трубачкі ўвагнутая мяжа падзелу паступова выпрамяляецца (рыс. 190, б) і адразу знікае пры крытычнай тэмпературы эфіру, роўнай 194°C. Пры гэтай тэмпературы і вышэй эфір у трубачцы знаходзіцца ў аднародным стане

(рыс. 190, в). Паступова ахалоджваючы пасля гэтага трубачку, можна назіраць крытычны стан эфіру (рыс. 190, г) (змясціва ў трубачцы паямнее), а за ім і паяўленне мяжы, якая аддзяляе вадкасць ад пары (рыс. 190, д).

У наступнай табліцы прыводзяцца крытычныя тэмпературы ў градусах Цэльсія і крытычныя ціскі ў $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$ некаторых рэчываў.



Рыс. 190. Да доследу з крытычным станам эфіру.

Рэчыва	Крытычная тэмпература (у °C)	Крытычны ціск (у ат)
Вада	374	218
Спірт	243	63
Эфір	194	35
Вуглякіслы газ	31	73
Кісларод	—119	50
Азот	—147	33,5
Вадарод	—240	12,8
Гелій	—268	2,25

122. Звадкаванне газу. З адкрыццём наяўнасці ў кожнага рэчыва крытычнай тэмпературы стала зусім ясным, чаму доўгі час не ўдавалася перавесці ў вадкі стан некаторыя газы: крытычная тэмпература гэтых газу вельмі нізкая. Каб ператварыць гэтыя газы ў вадкасць,

неабходна было перш за ўсё ахаладзіць іх ніжэй крытычнай тэмпературы.

У 1883 г. быў ператворан у вадкасць вадарод пры тэмпературы -244°C . У 1910 г. галандскі вучоны Камерлінг-Онэс атрымаў вадкі гелій, тэмпература кіпення якога роўна -261°C .

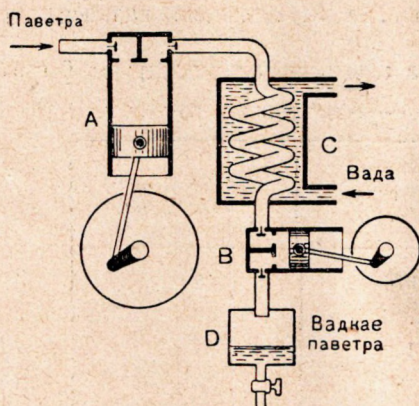
Ахалоджваючы звадкаваныя газы шляхам хуткага выпарэння, атрымалі іх у цвёрдым стане. У 1913 г. Камерлінг-Онэс атрымаў цвёрды вадарод; яго тэмпература плаўлення аказалася роўнай $-257^{\circ},1\text{C}$.

Далей удалося пры тэмпературы $-271^{\circ},9\text{C}$ атрымаць у цвёрдым стане гелій. Такім чынам, у цяперашні час усе вядомыя на Зямлі рэчывы атрыманы ў вадкім і цвёрдым станах.

Прывядзём табліцу тэмператур кіпення і зацвердзявання некаторых рэчываў пад нармальным ціскам (у градусах).

Рэчыва	Хлор	Кісларод	Азот	Вадарод	Гелій
Тэмпература кіпення	$-33,8$	-183	-195	-253	-269
Тэмпература зацвердзявання	-102	-219	-210	-257	$-271,9$

Паветра ў вадкім стане лёгка падзяліць на складаючыя яго газы. Пры выпарэнні вадкага паветра спачатку выпараюцца газы, якія маюць больш нізкую тэмпературу кіпення: неон, азот, а затым аргон,



Рыс. 191. Схема будовы машыны для атрымання вадкага паветра.

кісларод і інш. Атрыманыя такім шляхам газы шырока выкарыстоўваюцца ў тэхніцы. Кісларод, напрыклад, у сумесі з ацэтыленам (або вадародам) выкарыстоўваецца для зваркі і рэзання металаў.

Кісларод выкарыстоўваецца таксама для выдзімання ў доменных працэсах. Аргон і неон ідуць для напаўнення электрычных ламп; азот — для атрымання аміяку і г. д. Вось чаму важна прамысловае атрыманне вадкага паветра.

Будова прамысловых машын для атрымання вадкага паветра заснавана на ахаладжэнні паветра пры хуткім яго расшырэнні.

Схема будовы машыны для атрымання вадкага паветра паказана на рыс. 191. Паветра засасваецца звонку ў кампрэсар А і сціскаецца поршнем да ціску ў некалькі дзесяткаў атмасфер.

У змеевіку С сціснутае кампрэсарам паветра ахалоджваецца ў ім вадой; далей яно паступае ў расшыральнік (дэтандэр) В, дзе, расшы-

раючыся і выконваючы пры гэтым работу, ахалоджваецца да тэмпературы ніжэй крытычнай. Пры зваротным ходзе поршня дэтандэра паветра кандэнсуецца ў вадкасць, якая збіраецца ў сасуд D.

Савецкі вучоны П. Л. Капіца замест цыліндра з паступальна-зваротным рухам поршня прымяніў турбіну (турбадэтандэр), якая верціцца сіснутым паветрам. Гэтая ўстаноўка аказалася ў многа разоў больш прадукцыйнай і эканамічнай, чым машыны іншых сістэм.

Прымяняючы ў машынах у якасці ахаладжальніка вадкае паветра, якое кіпіць, атрымліваюць вадкі вадарод. Ён з'яўляецца самай лёгкай вадкасцю, яе шчыльнасць $0,07 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Выпарваючы вадкі вадарод пад паніжаным ціскам, можна яшчэ больш панізіць тэмпературу; пры тэмпературы -257° вадарод ператвараецца ў цвёрды стан, яго шчыльнасць у гэтым стане $0,08 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. Пры тэмпературы цвёрдага вадароду ўсе рэчывы, за выключэннем гелія, знаходзяцца ў вадкім і цвёрдым станах. Пасля многіх спроб удалося, нарэшце, ператварыць у вадкасць і гелій. Для гэтага прыйшлося гелій папярэдне ахаладзіць кіпячым вадкім вадародам.

123. Уласцівасці звадкаваных газаў. Звадкаваныя газы хутка выпараюцца. Для іх захавання Дзьюар сканструяваў спецыяльныя шкляныя сасуды з падвойнымі сценкамі, з унутранай прасторы паміж якімі выкачана паветра. Такім шляхам амаль выключаецца цеплаабмен змесціва сасудаў з навакольным асяроддзем праз канвекцыю і цеплаправоднасць. Для памяншэння награвання спрамяненнем сценкі робяцца люстранымі. Адзін з тыпаў сасуда Дзьюара можна бачыць у тэрмасе, які служыць для захавання ежы ў гарачым стане.

Пры тэмпературы звадкаваных газаў вялікая колькасць рэчываў пераходзіць у цвёрды стан. Так, напрыклад, абліваючы вадкім паветрам ртуць, налітую ў спецыяльную форму, можна атрымаць бліскучы ртутны малаточак, якім лёгка забіць у дошку невялікі цвік. Апусціўшы ў бакал з вадкім паветрам прабірку са спірта, мы атрымаем цвёрды спірт, тэмпература замярзання якога -114°C .

Фізічныя ўласцівасці многіх рэчываў пры тэмпературы звадкаваных газаў значна змяняюцца. Так, напрыклад, ртуць і цынк робяцца коўкімі, свінец — пластычны метал — робіцца пругкім, як сталь; звяночак, зроблены з свінцу, звініць. Некаторыя целы, пругкія пры звычайнай тэмпературы, калі яны ахалоджаны ў звадкаваным газе, робяцца крохкімі, як шкло. Так, напрыклад, кавалак гумы пасля ахаладжэння ў вадкім паветры лёгка ламаецца, а гумавы мячык пры ўдары разбіваецца ўшчэнт.

Дзякуючы наяўнасці багатай колькасці кіслароду вадкае паветра моцна садзейнічае гарэнню. Кавалак ваты, змочаны вадкім паветрам, успыхвае, як порох. Вугальны парашок, які прамочан вадкім паветрам, уяўляе сабой рэчыва, якое на выбуховай сіле не ўступае дынаміту.

РАЗДЕЛ XII.

ЦЕПЛАВЫЯ РУХАВІКІ.

124. Работа пры расшырэнні газу. Разгледзім, як у прасцейшым выпадку падлічыць работу, якая выконваецца газам пры расшырэнні.

Уявім сабе, што ў цыліндры пад поршнем, плошча якога S , знаходзіцца які-небудзь газ, ціск якога роўны p (рыс. 192, а). Сіла, з якой газ цісне на поршань, вызначаецца па формуле $F = p \cdot S$. Калі награвать газ пры пастаянным ціску, то ён расшырыцца і поршань перамясціцца на некаторую адлегласць h .

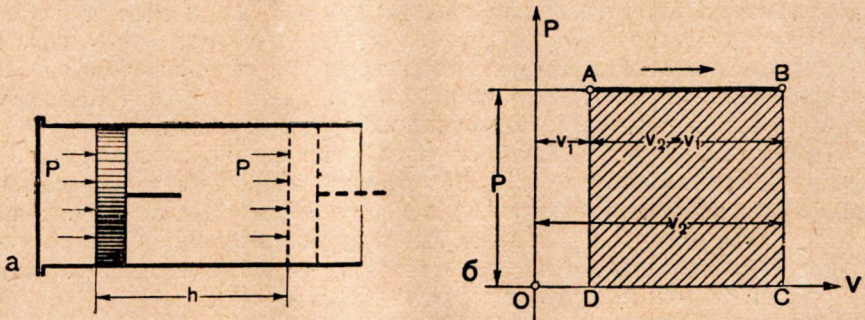


Рис. 192. Да разліку работы пры ізабарычным расшырэнні газу.

Газ пры гэтым выканае работу $A = p \cdot Sh$. Але $Sh = V_2 - V_1$ ёсць павелічэнне аб'ёму газу; значыць,

$$A = p(V_2 - V_1):$$

работа газу пры ізабарычным расшырэнні роўна здабытку ціску газу на павелічэнне яго аб'ёму.

Графічна работа, выкананая газам пры ізабарычным расшырэнні, будзе паказана плошчаю прамавугольнага $ABCD$, аснова якога роўна $V_2 - V_1$, а вышыня p (рыс. 192, б).

125. Цеплавы рухавік. Умовы, неабходныя для работы цеплага рухавіка. Цеплавым рухавіком называецца машына, у якой адбываецца ператварэнне энергіі, ітрыманай пры згаранні паліва, у механічную энергію.

Рэчыва, якое выконвае работу ў цеплавых рухавіках, называецца рабочым целам, або рабочым рэчывам. У паравых рухавіках такім рабочым рэчывам з'яўляецца пара, а ў рухавіках унутранага згарання — газ.

Існуюць два віды цеплавых рухавікоў: рухавікі ўнутранага згарання і паравы рухавік. Як яны пабудаваны, мы разгледзім далей, а зараз устанавім агульныя ўмовы, якія адносяцца да ўсіх цеплавых рухавікоў, неабходныя, каб ператварыць энергію згараючага паліва ў работу машын і механізмаў. Гэтыя ўмовы мы высветлім на прыкладзе работы парасілавой устаноўкі, схема якой паказана на рыс. 193.

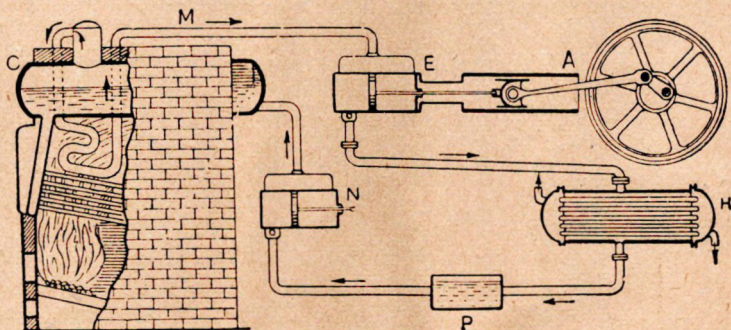


Рис. 193. Схема парасілавой устаноўкі.

Адной з частак парасілавой устаноўкі з'яўляецца топка з паравым катлом С (аб будове катлоў гл. § 128). У катле ўтвараецца пара, якая пад ціскам накіроўваецца па трубе М у цыліндр паравой машыны Е. Тут пара расшыраецца і, рухаючы поршань, выконвае работу. Пры дапамозе перадаючага механізма А зваротна-паступальны рух поршня пераўтвараецца ў вярчальны рух махавіка, які прыводзіць у рух рабочыя часткі станкоў, сельскагаспадарчых машын, генератараў току і г. д.

Адпрацаваўшая пара выштурхоўваецца ў спецыяльнае прыстасаванне К, якое называецца кандэнсатарам, дзе яна, праходзячы праз трубы, якія ахалоджваюцца цякучай вадой, траціць частку сваёй унутранай энергіі і ператвараецца ў вадку. Гэтая вада накіроўваецца спачатку ў жывільны бак Р, дзе ачышчаецца, а з яго насосам N падаецца назад у катёл.

Асноўнымі часткамі ўсякай парасілавой устаноўкі з'яўляюцца: награвальнік (кацёл з топкай), цыліндр з рабочым рэчывам (парай) і халадзільнік (кандэнсатар). Практыка паказала, што любы цеплавы рухавік можа працаваць толькі пры наяўнасці ўсіх гэтых частак.

Асабліва сурова работы цеплавых рухавікоў заключаецца ў тым, што частка энергіі, якую атрымлівае рабочае рэчыва ад награвальніка, абавязкова аддаецца халадзільніку (кандэнсатару).

Няхай рабочае цела атрымала ад награвальніка колькасць цеплыні ў Q_1 калорый. Частка гэтай колькасці цеплыні ў рухавіку ператвараецца ў механічную энергію, а астатняя частка, няхай гэта будзе Q_2 калорый, пераходзіць ад рабочага цела да халадзільніка. Гэты працэс схематычна паказан на рыс. 194: работа выконваецца толькі за лік рознасці энергіі $Q_1 - Q_2$.

У кожным цеплавым рухавіку не ўся колькасць цеплыні, атрыманая рабочым целам ад награвальніка, ператвараецца ў механічную энергію. Частка колькасці цеплыні абавязкова паглынаецца халадзільнікам. У гэтым заключаецца важнейшая асаблівасць работы цеплага рухавіка.

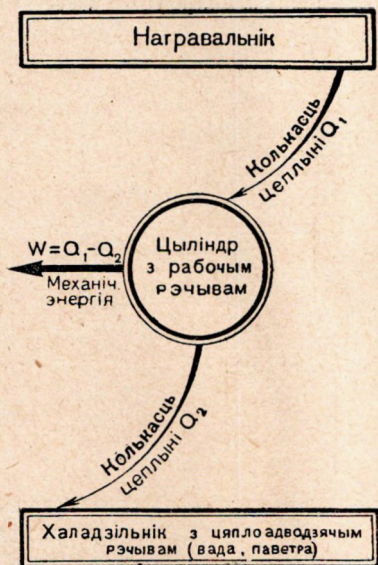


Рис. 194. Схема працэсу ператварэння энергіі ў цеплавым рухавіку.

Што трэба для таго, каб зрабіць поўнае ператварэнне ўнутранай энергіі порцыі пары ў кінетычную энергію руху поршня паравой машыны? Для гэтага многія мільярды малекул, якія бязладна рухаюцца, павінны былі б дружна падляцець да поршня і перадаць яму ўвесь свой запас кінетычнай энергіі.

Нават калі б такі працэс быў магчымы, то ўсё роўна пры гэтым захавалася частка ўнутранай энергіі пары ў выглядзе патэнцыяльнай энергіі ўзаемадзеяння малекул.

Такім чынам, унутраная энергія цел не можа поўнасцю пераходзіць у механічную энергію руху механізмаў. Гэты вывад мае велізарнае практычнае значэнне, таму што **ён звязан з праблемай павышэння каэфіцыента карыснага дзеяння машын.**

126. Каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавых рухавікоў. Пры будове цеплавых рухавікоў важна перш за ўсё дабіцца, каб як мага большая колькасць энергіі згараемага паліва ператваралася ў меха-

У § 76 было паказана, што механічная энергія рухаючыхся цел пры ўсіх ператварэннях поўнасцю пераходзіць ва ўнутраную энергію.

Інакш абстаіць справа, калі, наадварот, унутраная энергія цела ператвараецца ў механічную энергію. Практыка паказала, напрыклад, што ўнутраная энергія газу або пары толькі часткова ператвараецца ў энергію руху механізмаў.

Прычыну гэтага няцяжка зразумець, калі ўспомніць, што ўнутраная энергія цел складаецца з кінетычнай і патэнцыяльнай энергіі атамаў і малекул, якія знаходзяцца ў стане хаатычнага руху.

нічну енергію, інакш кажучы, пры мінімальнай затраце паліва атрымлівалася максімальная работа. Тады рухавік будзе эканамічным. Ведаючы колькасць цеплыні Q_1 , перададзеную рабочаму целу ад награвальніка, і колькасць цеплыні $Q_1 - Q_2$, ператвораную ў механічную энергію, можна ацаніць ступень эканамічнасці гэтага працэсу ператварэння.

Адносіна колькасці цеплыні, ператворанай машынай у механічную энергію, да колькасці цеплыні, атрыманай ад награвальніка, называецца каэфіцыентам карыснага дзеяння цеплавой машыны (к. к. дз.).

К. к. дз. машыны прынята абазначаць літарай η (грэч. «эта»):

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Вывучаючы ўмовы атрымання работы за кошт унутранай энергіі пары ў паравых машынах, Карно ў 1824 г. устанавіў, што каэфіцыент карыснага дзеяння любога рэальнага цеплавога рухавіка не можа перавышаць велічыні $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$, дзе T_1 — абсалютная тэмпература награвальніка, а T_2 — абсалютная тэмпература халадзільніка. Чым бліжэй к. к. дз. рухавіка да гэтай велічыні, тым ён больш дасканалы. Гэты вывад добра апраўдваецца на практыцы.

Адсюль вынікае, што для павышэння каэфіцыента карыснага дзеяння цеплавога рухавіка трэба павялічыць тэмпературу награвальніка і панізіць тэмпературу халадзільніка.

Прыклад. Пара ўваходзіць у цыліндр паравой машыны пры тэмпературы 200°C , г. зн. пры тэмпературы 473°K , а выходзіць пры тэмпературы 100°C , або 373°K .

Каэфіцыент карыснага дзеяння такой машыны не можа быць больш за велічыню:

$$\frac{473 - 373}{473} \cdot 100\% \approx 21\%.$$

К. к. дз. цеплавых рухавікоў наогул невялікі.

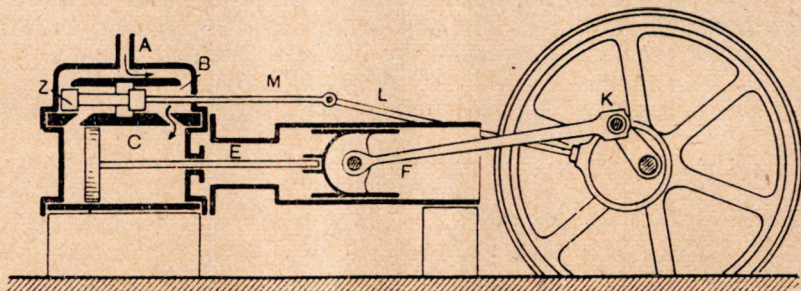
127. Паравая машына. У паравой машыне энергія пары непасрэдна пераўтвараецца ў энергію руху поршня.

На рис. 195 паказана схема будовы аднацыліндравай паравой машыны. Пара з паравога катла па трубе A паступае ў параразмеркавальную каробку B , а адтуль у рабочы цыліндр C — па пераменна то з аднаго, то з другога боку поршня. Размеркаванне пары робіцца пры дапамозе залатніка Z^1 .

Калі пара паступае ў правую частку цыліндра (такі выпадак паказан на рис. 195), то яна штурхае поршань улева, а адпрацаваўшая пара выіскаецца і выходзіць праз вывадную трубу (на рысунку гэтая труба не паказана). Затым, наадварот, пара паступае ў левую частку цыліндра і штурхае поршань управа.

¹ Ёсць машыны, у якіх параразмеркаванне ажыццяўляецца не залатніком, а спецыяльнымі клапамамі.

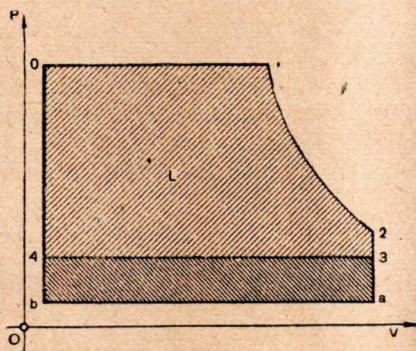
Пры дапамозе штока E , шатуна F і кривашыпа K зваротна-паступальны рух поршня ператвараецца ў вярчальны рух вала машыны і махавага кола. У сваю чаргу махавое кола праз перадаючы механізм L і M перамяшчае залатнік, які па чарзе ўпускае пару то з правага, то з левага боку поршня.



Рыс. 195. Схема будовы паравой машыны.

Дыяграма работы машыны паказана на рыс. 196. Лінія 0 — 1 паказвае ўпуск пары пры пастаянным ціску; у пункце 1 — адсечка пары (спыненне доступу пары ў цыліндр). Затым ідзе расшырэнне па крывой 1 — 2. Перад пачаткам выпуску ціск пары ў цыліндры вымяраецца ардынатай пункта 2, а ў момант адкрыцця выпускной трубы ён адразу спадае да ціску, паказанага на чарцяжы ардынатай пункта 3. Выпуск адбываецца пры пастаянным ціску (лінія 3 — 4). Упускам свежай пары ціск у пункце 4 павышаецца да пачатковага.

Велічыня ціску пры выпуску пары залежыць ад ціску ў тым асяроддзі, куды выпускаецца пара. Калі пара выпускаецца ў паветра, то гэты ціск, відавочна, будзе блізкім да атмасфернага.



Рыс. 196. Дыяграма работы паравой машыны.

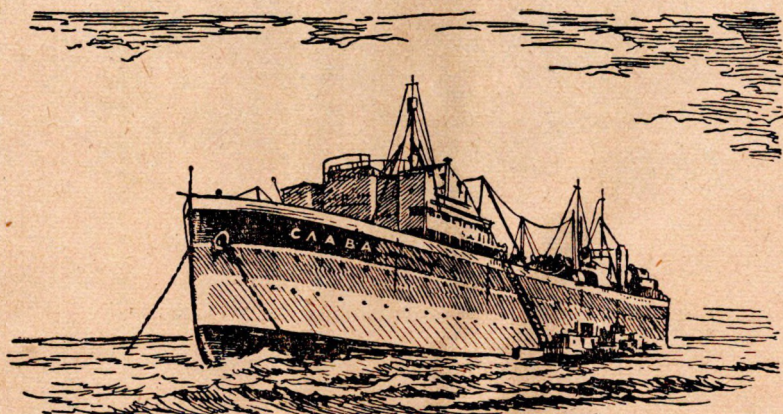
Чым ніжэйшы ціск пары пры выпуску, тым большую работу выконвае пара, перамяшчаючы поршань у цыліндры. Таму ў паравых машынах часта выпуск адпрацаваўшай пары адбываецца не ў паветра, а ў кандэнсатар. Кандэнсатарам называецца прыстасаванне, у якім адпрацаваўшая пара ахалоджваецца, ператвараецца ў вадку і адкачваецца насосам; з прычыны гэтага ў кандэнсатары падтрымліваецца паніжаны ціск.

У выпадку работы паравой машыны з кандэнсатарам выпуск

пары на дыяграме будзе абазначан лініяй ab , якая ляжыць ніжэй лініі $3-4$ (рыс. 196). Заштрыхаваная плошча L паказвае велічыню карыснай работы, выкананай парай за адзін цыкл.

Плошча $0-1-2-ab-0$ большая, чым плошча $0-1-2-3-4-0$; значыць, машына, якая працуе з кандэнсацияй пары, выканае больш карыснай работы, чым машына без кандэнсацыі (пры адной і той жа колькасці пары).

Не толькі шляхам прымянення кандэнсатараў можна павысіць к. к. дз. машыны. З дыяграмы (рыс. 196) відаць, што павышэнне пачатковага ціску, г. зн. перамяшчэнне лініі $0-1$ вышэй, таксама можа даць павелічэнне карыснай работы машыны. А паколькі для



Рыс. 197. Кітабойная база «Слава».

атрымання пары больш высокага ціску трэба затраціць параўнальна невялікую колькасць дадатковай энергіі, то прымяненне пары высокага ціску ў паравых машынах з'яўляецца больш выгадным.

Паравыя машыны захаваліся ў цяперашні час на старых электрастанцыях малой магутнасці. Дзе-ні-дзе іх яшчэ можна сустрэць на невялікіх фабрычна-заводскіх прадпрыемствах. У сельскай і лясной гаспадарках, а таксама на торфараспрацоўках шырока прымяняецца асобы від паравых рухавікоў — лакамабілі. Асабліваць лакамабіля заключаецца ў тым, што ў адной устаноўцы спалучаюцца паравыя кацёл і паравая машына. На рыс. 197а паказан агульны выгляд перасовачнага лакамабіля. У лакамабілі выкарыстоўваюцца мясцовыя віды паліва: торф, адыходы лясной гаспадаркі, а ў стэпавых раёнах — салома.

Найбольшае распаўсюджванне паравая машына мае зараз на транспарце (паравоз, параход). Гэтаму многа садзейнічае прастата ў абыходжанні з ёй, магчымасць у шырокіх межах мяняць яе скорасць і досыць проста мяняць рух на працілеглы (даваць задні ход) і, што асабліва каштоўна, выкарыстоўваць любыя віды паліва.

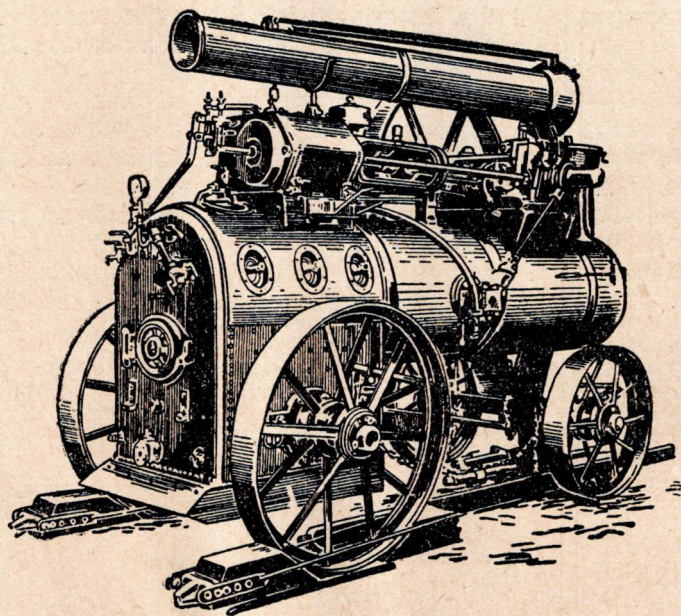


Рис. 197а. Знадворны выгляд аднаго з тыпаў лакамабіля.

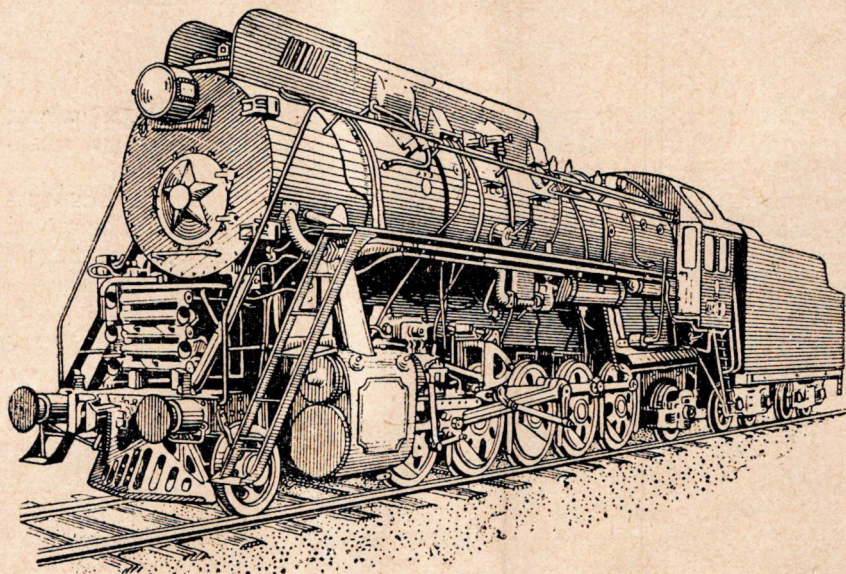
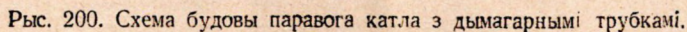
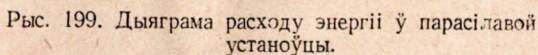


Рис. 198. Таварны паравоз серыі Л.

Каэфіцыент карыснага дзеяння лепшых сучасных паравых машын не вышэй 15%.

Павышэнне к. к. дз.
цеплавых рухавікоў
з'яўляецца і зараз
вялікай тэхнічнай
праблемай.

11



яна ператвараецца ў ваду, якая вяртаецца ў кацёл, або, нарэшце, выкарыстоўваецца для абагравальных метаў.

128. Паравыя катлы. Адною з асноўных частак парасілавой устаноўкі з'яўляецца кацёл. Кожны паравы кацёл складаецца з топкі для спальвання паліва, топкавай прасторы, барабана катла з вадзяной і паравой прасторай, герметычна закрытай. Кожны кацёл мае пэўную прадукцыйнасць, вымяраемую колькасцю вады, якую ён здольны выпарыць на працягу адной гадзіны пры пэўнай тэмпературы і ціску. Частка катла, якая ў час топкі прыходзіць у судакрананне з полымем, называецца паверхняй нагрэву.

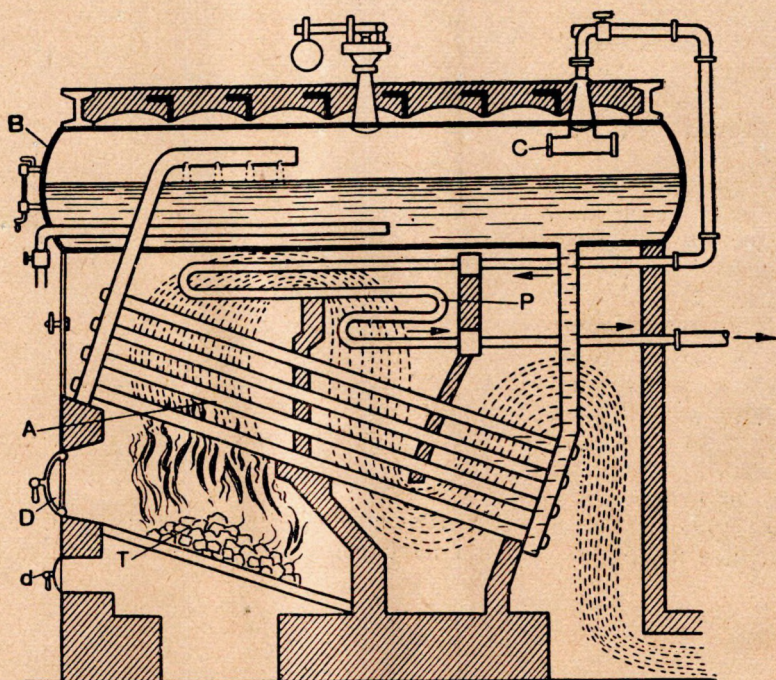


Рис. 201. Схема будовы вадатрубнага катла.

На рис. 200 паказан дымагарны кацёл. У сярэдзіне гэтага катла змешчаны рад трубак А, па якіх прадукты гарэння праходзяць у дымавую каробку В, адкуль пападаюць у дымавую трубу. Такія катлы ўстанаўліваюць на лакамабілях і на паравозах. Шматлікія дымагарныя трубки даюць вялікую паверхню нагрэву, у выніку чаго ў іх добра выкарыстоўваецца энергія, якая атрымліваецца пры згаранні паліва. Вада ў гэтых катлах знаходзіцца паміж дымагарнымі трубамі.

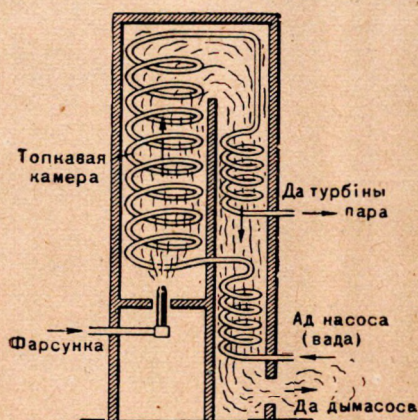
Можна зрабіць катлы інакш: па трубках пусціць ваду, а паміж трубамі — полымя. Такія катлы называюцца вадатрубнымі.

На рис. 201 паказан разрез вадатрубнага катла. Асноўнымі часткамі яго з'яўляюцца топка Т, кіпяцільныя трубы А, барабан В, сухапарнік С і параперагравальнік Р.

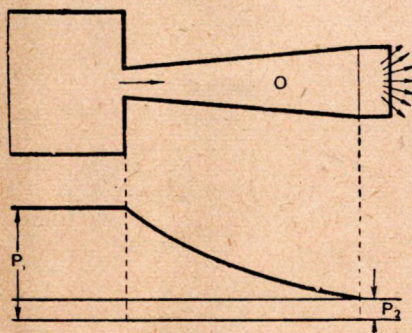
У кіпяцільных трубках адбываецца працэс параўтварэння. Пара, якая ўтвараецца ў іх, паступае ў барабан В, дзе і збіраецца ў верхняй частцы над вадой. З бара-

бана пара праз сухапарнік C праходзіць па злучальнай трубе ў параперагравальнік P , дзе награваетца.

Паліва ў гэтым катле закідваецца праз дзверцы D , а паветра, неабходнае для гарэння паліва, падаецца праз другія дзверцы d у паддувала. Гарачыя газы падымаюцца ўверх і, абгінаючы спецыяльна ўстаноўленыя перагародкі, праходзяць шлях, паказаны на рыс. 201 пункцірнымі лініямі.



Рыс. 202. Схема праматочнага катла сістэмы праф. Рамзіна.



Рыс. 203. Канічная насадка — сапло паравой турбіны і графік змянення ціску пары пры праходжанні праз сапло.

Далейшым удасканаленнем у галіне кацельнай тэхнікі з'явілася стварэнне А. К. Рамзіным праматочных катлоў. У гэтых катлах награванне вады адбываецца ў доўгіх трубках, зробленых у выглядзе змеевікоў. Вада падаецца ў змеевікі катла насосам. Праходзячы праз змеевікі, вада цалкам выпараецца; пара, якая ўтварылася, пераграваетца да патрэбнай тэмпературы і, такім чынам, у гатовым выглядзе выходзіць са змеевікоў (рыс. 202).

129. Паравыя турбіны. Сярод цеплавых рухавікоў важнае месца займаюць паравыя турбіны. У адрозненне ад поршневых паравых рухавікоў у паравых турбінах выкарыстоўваецца не энергія пругкасці пары, а кінетычная энергія струменя выцякаючай пары.

Дапусцім, што ціск пары ў катле ровен p_1 . Дадзім пары магчымасць свабодна выцякаць з катла праз якую-небудзь адтуліну або праз насадку — сапло O (рыс. 203). Пры выцячэнні праз сапло ціск пары будзе спадаць і ў вусці сапла ён акажацца роўным некатораму ціску p_2 . Упачатку скорасць пары роўна нулю, пры выхадзе ж з сапла яна павялічваецца; пры гэтым ціск пары ў сапле спадае. Патэнцыяльная энергія пары пры спаданні яе ціску памяншаецца; адпаведна павялічваецца кінетычная энергія пары (па закону захавання і ператварэння энергіі). Выцякаючая з сапла пара пападае на лапаткі рабочага кода і прыводзіць яго ў вярчэнне.

Схема дзеяння аднаго з тыпаў турбін паказана на рыс. 204а. На вале A насаджан дыск B , па вобадзе якога замацаваны лапаткі L .

Супраць лапатак размяшчаюцца саплы *C*, у якія пара паступае з катла. У саплах пара расшыраецца і, выходзячы з іх вусцяў з вялікай скорасцю, пападае ў каналы, што ўтвараюцца лапаткамі, дзе траціць частку сваёй кінетычнай энергіі, якая ідзе на прывядзенне дыска *B* разам з валам у вярчальны рух. На рыс. 204б паказана кола аднадыскавай турбіны Лаваля (без кожуха).

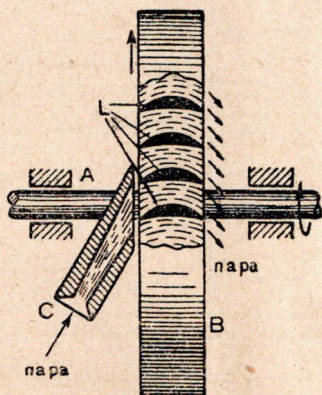


Рис. 204а. Схема дзеяння паравой турбіны.

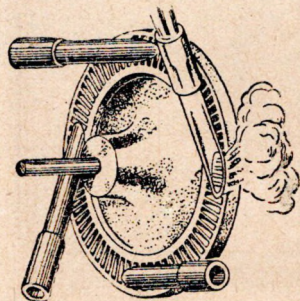


Рис. 204б. Знадворны выгляд кола паравой турбіны.

Турбіны маюць рад пераваг перад паравымі машынамі. Па-першае, турбіны атрымліваюцца пры пабудове больш кампактнымі, чым паравыя машыны той жа магутнасці. Па-другое, вялікая скорасць вярчэння турбіны дазваляе на электрастанцыях злучаць турбіны з генератарамі току без усякай зубчастай перадачы, таму што генератары патрабуюць вялікіх абаротаў. Па-трэцяе, у турбінах няма зваротна-паступальнага руху асобных частак, які прыходзілася б ператвараць у вярчальны рух, як гэта робіцца ў паравых машынах і на што расходуюцца энергія. Нарэшце, перавагай турбіны з'яўляецца чыстата яе кандэнсата (вады, атрыманай ад ахалоджанай адпрацаваўшай пары), што мае вялікае значэнне пры жыўленні паравых катлоў.

Каэфіцыент карыснага дзеяння турбін значна вышэйшы за паравыя машыны. У турбінах вялікай магутнасці ён дасягае 25%.

Вялікія дасягненні мае савецкая тэхніка ў канструяванні і пабудове паравых турбін.

Ленінградскі металічны завод ужо ў 1930 г. пачаў выпускаць турбіны магутнасцю ў 25 і 50 тыс. *квт* з ціскам пары 28 і 29 *ат* пры тэмпературы 375 і 400°C. У апошні час гэты завод будзе турбіны магутнасцю ў 100 тыс. *квт* і вышэй. На рыс. 205 паказан агульны выгляд адной з такіх магутных турбін.

Магутныя паравыя турбіны, якія выпускаюцца айчыннымі заводамі, жывяцца парай з ціскам 90 ат і тэмпературай 500°C . На электрастанцыях з гэтымі турбінамі расход паліва меншы, чым з турбінамі, якія працуюць на пары пры 400°C і ціску ў 29 ат .

Ленінградскі металічны завод (ЛМЗ) у 1952 г. пабудаваў паравую турбіну магутнасцю ў $150\,000 \text{ кет}$ пры $3000 \frac{\text{об}}{\text{мін}}$. Гэтая турбіна

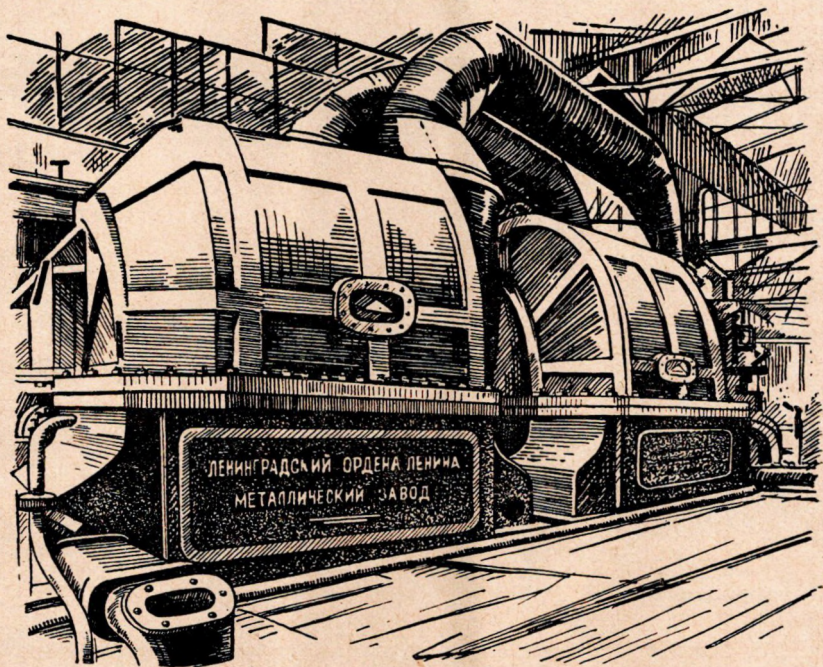


Рис. 205. Знадворны выгляд паравой турбіны высокага ціску магутнасцю ў $100\,000 \text{ кет}$, якая зроблена на Ленінградскім металічным заводзе.

працуе пры ціску пары 170 ат і тэмпературы 550°C . Прямаянамерна ў турбінах пары ціскам у $160\text{—}180 \text{ ат}$ пры тэмпературы $550\text{—}600^\circ\text{C}$ можа яшчэ даць эканомію паліва на $10\text{—}15\%$.

Кэфіцыент карыснага дзеяння парасілавой устаноўкі значна павышаецца, калі энергія адпрацаваўшай у турбіне пары выкарыстоўваецца для работы паравых молатаў і прэсаў, награве вадзі для бытавых патрэб: для лазняў і пральняў, для ацяплення будынкаў і г. д.

Цеплафікацыя — гэта цэнтралізаванае забеспячэнне жылых дамоў і прамысловых прадпрыемстваў энергіяй адпрацаваўшай пары. У Савецкім Саюзе праблема цеплафікацыі аддаецца вельмі вялікай увага. У радзе буйных цеплавых электрастанцый адпрацаваўшая пара ад турбін награве вадзі, якая выкарыстоўваецца для ацяплення будынкаў.

На рис. 206 показана одна з магчымых схем выкарыстання энергіі пары на цеплаэлектрацэнтралі. Перагрэтая пара з катла паступае ў турбіну, якая верціць ратар генератара. Адрываючаяся ў турбіне пара часткова паступае на вытворчасць, а частка яе ідзе ў спецыяльны падагрэвальнік. У падагрэвальніку пара награвеае вадку, якая ідзе на ацяпленне, у лазні, пральні і на розныя вытворчасці.

Кандэнсуючыся ў падагрэвальніку, пара ператвараецца ў вадку, якая спецыяльнымі насосамі затым падаецца ў катёл.

130. Рухавік унутранага згарання. У паравых машынах і паравых турбінах для пераўтварэння энергіі паліва ў механічную работу карыстаюцца вадзяной парай, якая атрымліваецца ў паравых катлах. Побач з гэтым існуюць цеплавые рухавікі, у цыліндрах якіх адначас-

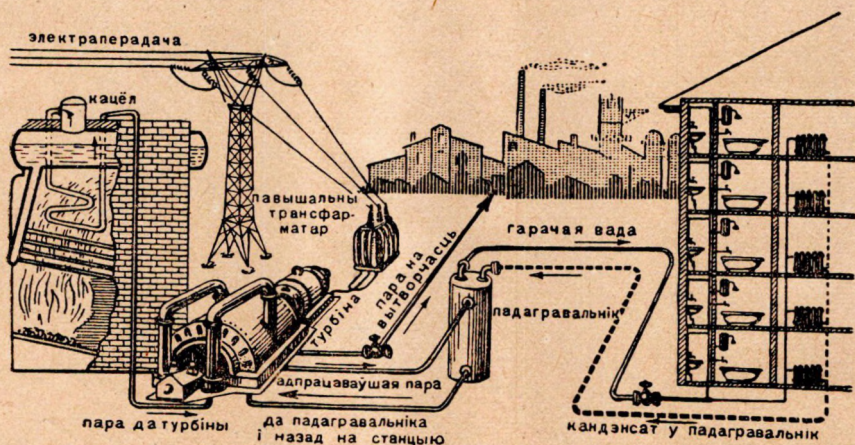


Рис. 206. Схема размеркавання пары, атрымліваемай у парасілавой устаноўцы.

сова працякаюць працэсы згарання паліва, выдзялення пры гэтым энергіі і ўтварэння за кошт часткі яе механічнай работы; такія рухавікі называюцца рухавікамі ўнутранага згарання. У гэтых рухавіках выкарыстоўваецца вадкае або газападобнае паліва. Вадкае паліва перад спальваннем выпараецца або распыляецца ў паветры.

Разгледзім спачатку будову чатырохтактнага бензінавага аўтамабільнага рухавіка. Прынцып дзеяння рухавікоў, якія прымяняюцца на трактарах і самалётах, падобны да аўтамабільнага.

Схема чатырохтактнага рухавіка ўнутранага згарання і дыяграма работы такога рухавіка паказаны на рис. 207.

Са схемы відаць, што ўнутры цыліндра *A* можа свабодна перамяшчацца поршань *B*. У верхняй частцы цыліндра змяшчаюцца два клапаны. Праз клапан *D* адбываецца ўпуск так званай гаручай сумесі, якая складаецца з паветра і найдрабнейшых частак вадкага або газападобнага паліва. Клапан *E* служыць для выдалення з цы-

ліндра адпрацаваўшых газаў; *C* — запальнік (свеча), прызначэнне якога — успалымняць сумесь, якая знаходзіцца над поршнем.

На дыяграме, размешчанай пад схемай, паказаны змяненні, якія адбываюцца ў стане рабочага рэчыва пры руху поршня. Крайнія становішчы поршня ў цыліндры называюцца мёртвымі пунктамі (у тэхніцы іх называюць верхнім і ніжнім мёртвымі пунктамі). Ад гэтых становішчаў поршань пачынае зваротна-паступальны рух.

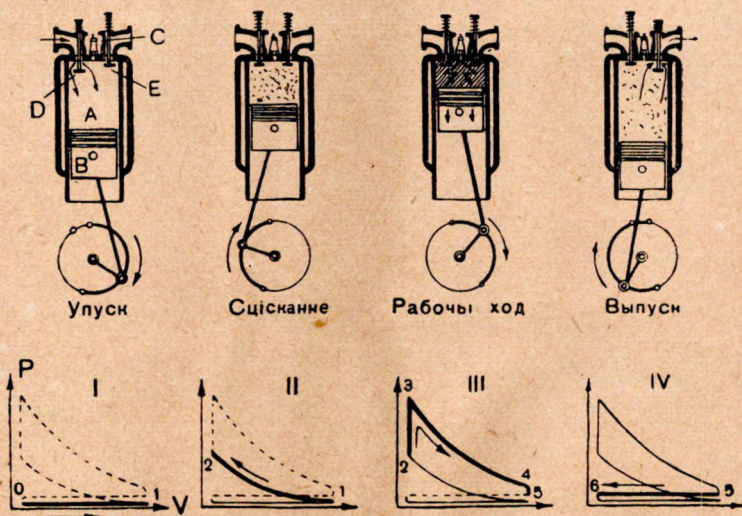


Рис. 207. Схема і дыяграма работы чатырохтактнага бензінавага рухавіка.

Адлегласць, якую праходзіць поршань ад аднаго мёртвага пункта да другога, называецца ходам поршня. Пры руху поршня ўніз спецыяльны размеркавальны механізм адкрывае клапан *D*, які на працягу ўсяго ходу поршня да ніжняга мёртвага пункта застаецца адкрытым. На працягу гэтага ходу ў цыліндр праз клапан паступае гаручая сумесь. Паколькі ўсасванне адбываецца пры пастаянным ціску, то на дыяграме гэты працэс паказан лініяй 0—1, якая паралельна восі абсцыс (рыс. 207, I).

Калі поршань прыйдзе ў ніжні мёртвы пункт, клапан *D* закрываецца, пачынаецца зваротны рух поршня ўверх, і гаручая сумесь, якая знаходзіцца пад поршнем, сціскаецца. Гэты працэс на рыс. 207, II паказан лініяй 1—2. У момант, калі поршань зноў дойдзе да верхняга мёртвага пункта, адбываецца запальванне сумесі (напрыклад, электрычнай іскрай).

Пры згаранні сумесі тэмпература прадуктаў згарання, якія ўтвараюцца ў цыліндры, рэзка павышаецца; у выніку гэтага рэзка павышаецца і ціск, прычым гэты працэс адбываецца вельмі хутка, поршань пры гэтым не паспявае прыкметна прасунуцца, так што працэс

павышэння ціску можна лічыць адбывающимся пры пастаянным аб'ёме. На рис. 207, III гэты працэс паказан прамой 2—3.

Пад уплывам высокага ціску прадуктаў згарання поршань зноў пачне перамяшчацца ўніз; пры гэтым у цыліндры будзе адбывацца іх расшырэнне (гэты працэс паказан на дыяграме крывой 3—4), і калі поршань прыйдзе ў ніжні мёртвы пункт, ціск у цыліндры паменшыцца. У гэты ж момант адкрыецца клапан *E*, у выніку чаго ціск у цыліндры яшчэ знізіцца (лінія 4—5).

Пры руху поршня ад ніжняга мёртвага пункта да верхняга клапан *E* застаецца ўвесь час адкрытым, і адпрацаваўшыя прадукты згарання, якія знаходзяцца ў цыліндры, выдаляюцца. Лінія выпуску

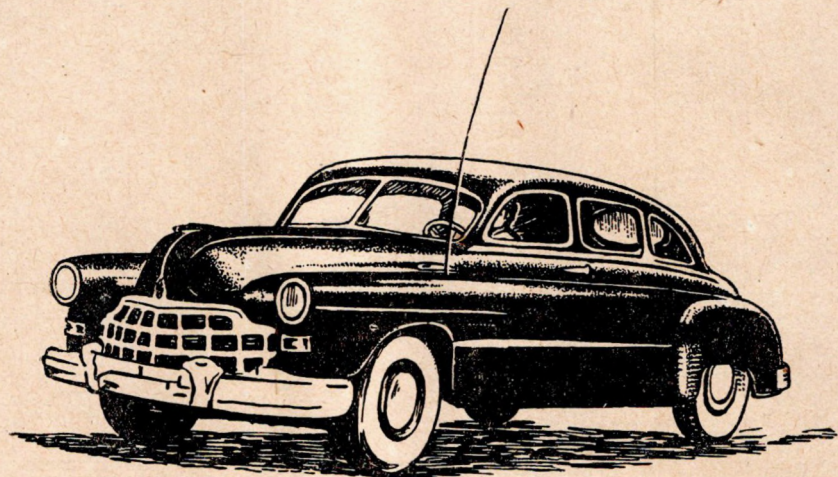


Рис. 208. Шасцімесны легкавы аўтамабіль ЗІМ з шасціцыліндравым рухавіком магутнасцю 90 к. с. вытворчасці Горкаўскага аўтазавода.

(5—6), паказаная на рис. 207, IV, не супадае на дыяграме з лініяй усаасвання.

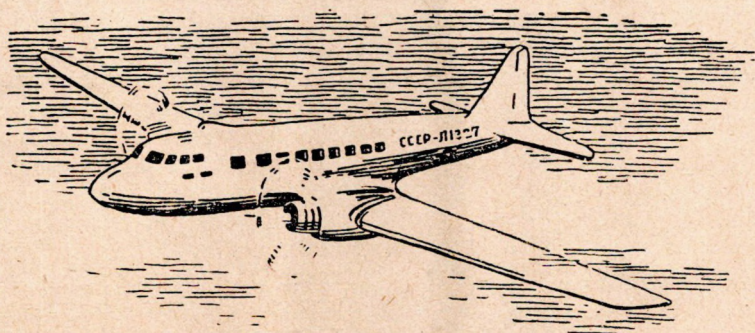
Працэс, на працягу якога адбываецца засасванне гаручай сумесі, называецца ўпускам, наступны ход—сцісканнем; за ім ідзе расшырэнне, або, як яго называюць, рабочы ход (у пачатку гэтага ходу адбываецца ўспышка гаручай сумесі і рэзкае павышэнне ціску, затым расшырэнне прадуктаў згарання); нарэшце, апошні ход—выпуск.

У разгледжаным намі рухавіку за чатыры хады, або, як кажуць, за чатыры такты, адбываецца толькі адзін рабочы такт, на працягу якога рухавік выконвае карысную работу. Такія рухавікі называюцца чатырохтактнымі.

На вале ўмацоўваецца масіўнае махавое кола, якое, запасаючы кінетычную энергію пры рабочих ходах поршня, затрачвае частку яе на выконванне работы ў час ходаў упуску, сціскання і выпуску, забяспечваючы плаўны ход рухавіка.

Для павелічэння магутнасці машыны чатырохтактныя рухавікі вырабляюцца з лікам цыліндраў ад двух да васьмі.

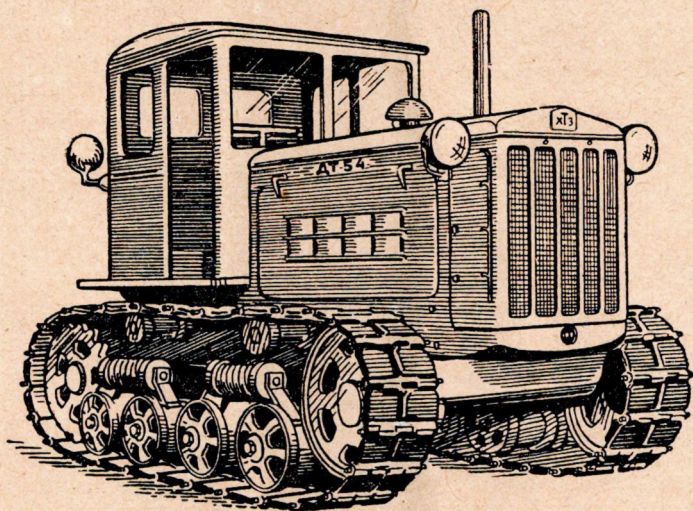
Прымяненні рухавікоў унутранага згарання надзвычай разнастайныя: аўтамабіль (рыс. 208), самалёт (рыс. 209), трактар (рыс. 210) і інш.



Рыс. 209. Пасажырскі двухматорны самалёт у палёце.

На рыс. 211 паказан разрэз аднацыліндравага чатырохтактнага рухавіка ўнутранага згарання.

Асноўнай часткай рухавіка з'яўляецца цыліндр, які закрыт зверху



Рыс. 210. Дызельны трактар ДТ-54.

здымнай галоўкай 19. Унутры цыліндра можа перамяшчацца поршань 2. Поршань уяўляе сабой металічны стакан, апырэзаны спружністымі кольцамі 3, якія ўкладваюцца ў канаўкі на поршні. Прызначэнне

поршневых кольцаў — не прапускаць газаў, якія ўтвараюцца пры згаранні паліва, у прамежкі паміж поршнем і сценкамі цыліндра. Поршань злучан з шатуном 4. Шатун служыць для перадачы руху каленчатаму валу 5.

Верхняя частка цыліндра злучаецца з двума каналамі, якія могуць закрывацца і адкрывацца пры дапамозе клапанаў 6 і 7. Клапаны закрываюць каналы з дапамогай sprужын 8 (sprужына клапана 7 на рысунку не паказана). Адкрыванне клапанаў адбываецца пры дапамозе

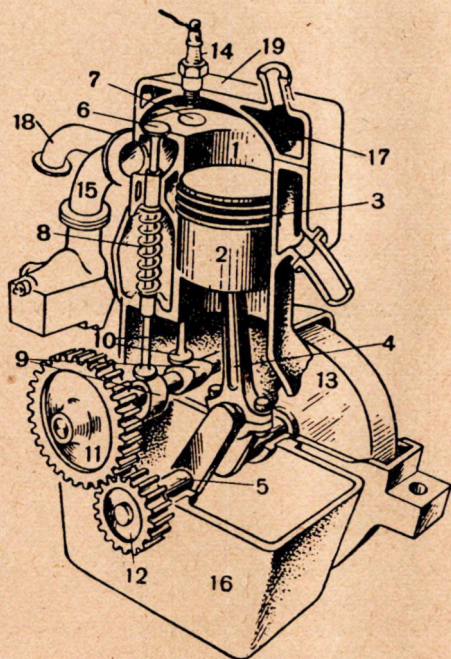


Рис. 211. Схематычны разрез аднацыліндравага рухавіка ўнутранага згарання.

кулачкоў 9, якія падымаюць пры сваім вярчэнні штурхальнікі 10.

Кулачкі замацаваны на размеркавальным вале, які прыводзіцца ў вярчэнне пры дапамозе шасцернаў 11, 12. Масіўны махавік 13 прызначан для памяншэння нераўнамернасці вярчэння каленчатага вала і вывядзення поршняў з мёртвых пунктаў.

Апрача клапанаў, у верхняй частцы цыліндра змяшчаецца свеча 14 для запальвання сумесі.

Гаручая сумесь падаецца ў цыліндр па трубе 15, якая злучана з карбюратарам, а адпрацаваўшыя газы выкідаюцца з цыліндра па трубе 18. Асновай для дэтaley кривашыпнага і размеркавальнага механізмаў, а таксама для аховы гэтых дэтaley ад уплываў навакольнага асяроддзя служыць картэр 16. Ніжняя частка картэра з'яўляецца рэзервуарам для масла.

Галоўка і верхняя частка бакавой паверхні цыліндра маюць двайныя сценкі; у прасторы 17

паміж гэтымі сценкамі цыркулюе вада, якая ахаладжвае цыліндры, утвараючы рубашку ахаладжэння.

131. Рухавік унутранага згарання — дызель. Ад чаго залежыць каэфіцыент карыснага дзеяння рухавіка ўнутранага згарання? Як і ва ўсякай цеплавой машыне, у гэтым рухавіку ёсць крыніца энергіі — награвальнік (такой крыніцай з'яўляецца згараючае паліва) і халадзільнік — атмасфернае паветра. Чым вышэйшая рознасць тэмператур паміж імі, тым вышэйшы к. к. дз. рухавіка.

Паколькі тэмпература газаў, якія атрымліваюцца пры згаранні сумесі, вялікая (парадку 1600—1800°C), то к. к. дз. рухавікоў унутранага згарання значна вышэйшы за к. к. дз. паравых машын. На практыцы к. к. дз. рухавікоў унутранага згарання парадку 20—30%.

Як можна яшчэ павысіць к. к. дз. гэтага рухавіка? Практыка і разлікі паказваюць, што для гэтага неабходна дабіцца большай ступені сціскання сумесі. Аднак у рухавіках аўтамабільнага тыпу сціскаць гаручую сумесь нельга вышэй 6 ат, бо яна, моцна награвваючыся, будзе раней часу самазагарання.

Нямецкі інжынер Дызель вынайшаў рухавік унутранага згарання, які назван яго імем. Гэты рухавік працуе па такому цыкле, які дазваляе пазбегнуць указаных вышэй цяжкасцей і значна павысіць к. к. дз.

Разгледзім прынцып дзеяння чатырохтактнага дызеля. На рыс. 212 паказана схема будовы цыліндра і дыяграма работы дызеля. У галоўцы цыліндра знаходзяцца: паліўны клапан В (фарсунка), клапаны—усасвальны С і выхлапны А. Клапаны, а таксама паліўны насос, які жывіць фарсунку, атрымліваюць рух ад асобага размеркавальнага вала, які ў сваю чаргу прыводзіцца ў рух ад каленчатага вала рухавіка.

Няхай пачатковым становішчам поршня а будзе верхні (левы, бо цыліндр паказан у гарызантальным становішчы) мёртвы пункт. Пры руху поршня ўправа адкрываецца ўсасвальны клапан С, праз які ў цыліндр засасваецца паветра. Гэты першы такт — усасванне — паказан на дыяграме (рыс. 212) ізабарай 0—1.

Усасвальны клапан С пры зваротным руху поршня ўлева закрываецца і на працягу ўсяго другога такту застаецца закрытым.

У цыліндры дызеля адбываецца сцісканне паветра (у бензінавым рухавіку, як указвалася ў § 130, сціскаецца гаручая сумесь).

На дыяграме гэты працэс паказан крывой 1—2.

Ступень сціскання ў дызелях вялікая (гл. табліцу на стар. 209), у выніку чаго тэмпература паветра ў канцы сціскання падымаецца да тэмпературы, дастатковай для ўспалымнення паліва. У момант прыходу поршня ў верхні (левы) мёртвы пункт пачынаецца падача паліва ў цыліндр з фарсункі В. Трапляючы ў гарачае паветра, дробна распыленае фарсункай паліва згарэе.

Згаранне паліва адбываецца тут не адразу, як у рухавіках хуткага згарання, а паступова, на працягу некаторай часткі ходу поршня ўправа. Працэс гарэння паліва ў выніку руху поршня ўправа адбываецца пры павелічэнні аб'ёму той прасторы, дзе гарэнне адбываецца.

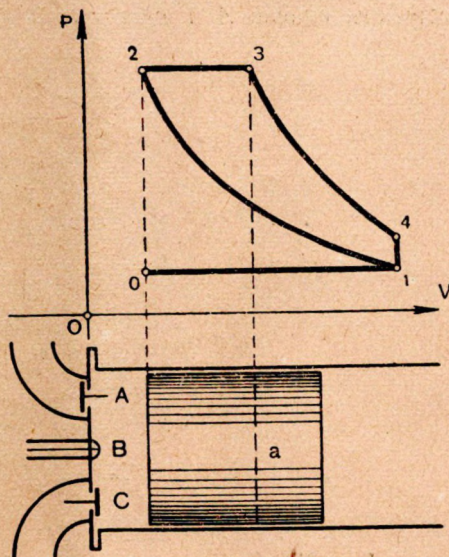


Рис. 212. Схема і дыяграма работы дызеля.

Таму ціск газаў у час работы фарсункі застаецца пастаянным. На дыяграме гарэнне паказана лініяй 2—3.

Такім чынам, згаранне сумесі адбываецца пры пастаянным ціску, у адрозненне ад рухавікоў хуткага згарання, дзе, як мы бачылі, згаранне адбываецца пры пастаянным аб'ёме.

Далейшае расшырэненне газаў (крывая 3—4) працягваецца да моманту прыходу поршня ў ніжні (правы) мёртвы пункт.

Калі поршань прыйдзе ў ніжні (правы) мёртвы пункт, адкрываецца выпускны клапан А і ціск газаў адразу спадае (4—1), пасля чаго

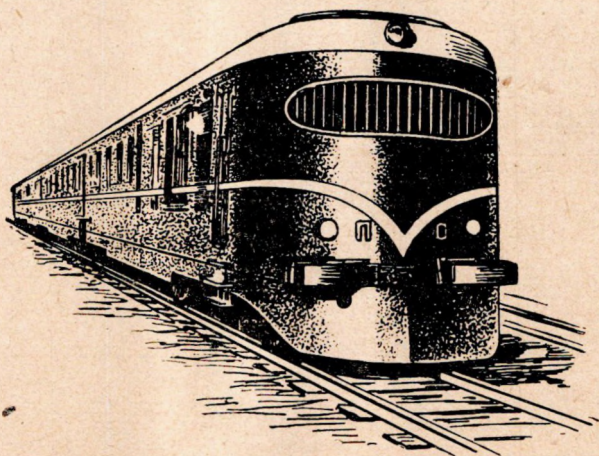


Рис. 213. Дизель-поезд на чыгуначным пучы Масква — Ленінград.

поршань вяртаецца да левага мёртвага пункта. У час усяго гэтага ходу выпускны клапан А застаецца адкрытым; праз яго адпрацаваўшыя газы выходзяць з цыліндра.

Лінія выпуску 1—0 на нашай дыяграме для прастаты паказана супадаючай з лініяй усасвання.

Дызель аказаўся больш эканамічным рухавіком, чым бензінавы, яго к. к. дз. дасягае 39%. Ён можа мець значна большую магутнасць (дзясяткі тысяч к. с.). Акрамя таго, дызель можа працаваць на больш танным паліве — нафце.

Дызелі вялікай магутнасці хутка знайшлі сабе прымяненне як у стачыянарных устаноўках, так і ў водным, чыгуначным і паветраным транспарце, а дызелі малой магутнасці ў апошні час з поспехам пачынаюць прымяняцца ў якасці рухавікоў аўтамашын, трактараў (рис. 210) і невялікіх суднаў. На рис. 213 паказан цеплавоз, а на рис. 214—агульны выгляд дызельнага суднавага рухавіка магутнасцю 3250 к. с.

Ніжэй у табліцы змяшчаюцца некаторыя паказчыкі, якія характарызуюць дызелі і рухавікі з хуткім згараннем паліва (напрыклад, бензінавыя рухавікі).

Характарыстыка некаторых рухавікоў унутранага згарання.

Тып рухавіка	Ступень сціскання (у ат)	К. к. дз. (у %)	Расход гаручага (у г на $\frac{\text{к. с.}}{\text{гадз}}$)
Дызелі	13—16	30—39	160—210
Бензінавыя рухавікі . . .	4,5—6	18—24	250—350

132. Рэактыўныя рухавікі. Развіццё авіяцыі зводзіцца да павелічэння скорасці, вышыні, грузапад'ёмнасці, далёкасці і надзейнасці палёту самалётаў. Усё гэта ў значнай ступені залежыць ад магчымасцей удасканалення рухавіка.

Рухавікі ўнутранага згарання з вінтамі-прапелерамі ўжо не забяспечваюць павелічэння скорасці і вышыні палёту самалётаў. Прычына гэтага зводзіцца да наступнага.

У самалёце з паветраным вінтом апошні, пры вярчэнні, адкідвае наветра, прымушаючы яго рухацца паскорана. Па трэцяму закону Ньютана, адкідаемая маса паветра дзейнічае на вінт, штурхае яго наперад, ствараючы гэтым цягу, якая рухае ўвесь самалёт. Цяга атрымліваецца, такім чынам, як вынік уздзеяння ў адказ (рэакцыі) паветра, якое адкідаецца вінтом. Вінт служыць пасрэднікам, які за кошт энергіі паліва выконвае работу на перамяшчэнні самалёта.

Як паказала практыка, сіла цягі вінта памяншаецца з павелічэннем скорасці. Справа ў тым, што з павелічэннем скорасці павялічваецца супраціўленне паветра вярчэнню вінта; пры скорасцях, блізкіх да скорасці гуку ў паветры (парадку $1200 \frac{\text{км}}{\text{гадз}}$), гэтае супраціўленне робіцца велізарным. У выніку большая частка карыснай работы рухавіка ідзе на пераадоленне супраціўлення паветра: каэфіцыент карыснага дзеяння рухавіка памяншаецца ў дзесяткі разоў. Для павелічэння скорасці самалёта прыходзіцца рэзка павялічваць магутнасць рухавіка, а гэта непазбежна прыводзіць да павелічэння вагі самалёта. Напрыклад, павелічэнне скорасці палёту самалётаў на $150—200 \frac{\text{км}}{\text{гадз}}$ было дасягнута за кошт падваення вагі самалёта. Вядома, гэта эканамічна нявыгадна.

Магутнасць рухавіка з вінтом-прапелерам рэзка памяншаецца таксама з павелічэннем вышыні палёту. На вялікай вышыні, дзе паветра вельмі разрэджанае, паветраны вінт наогул перастае рухаць самалёт.

Такім чынам, самалёты з паветранымі вінтамі-прапелерамі, якія прыводзяцца ў вярчэнне рухавікамі ўнутранага згарання, не могуць забяспечыць палётаў на вялікіх вышынях з вялікімі скорасцямі.

Свабоднымі ад указаных недахопаў аказаліся рэактыўныя рухавікі, якія ў цяперашні час усё больш і больш шырока ўкараняюцца ў авіяцыю, абумоўліваючы яе далейшае развіццё.

У рэактыўных рухавіках вінт адсутнічае. У гэтых рухавіках энергія паліва непасрэдна ператвараецца ў механічную энергію рухаючага рэактыўнага апарата. Цэламі, якія ўзаемадзейнічаюць паміж сабой, у іх з'яўляюцца ўжо не вінт і паветра, а струмень газу, які выцякае з рухавіка, і сам рухавік.

Струмень газу, рухаючыся з паскарэннем, стварае рэактыўную цягу, якая дзейнічае на рухавік у напрамку, процілеглым руху струменя, — у напрамку палёту.

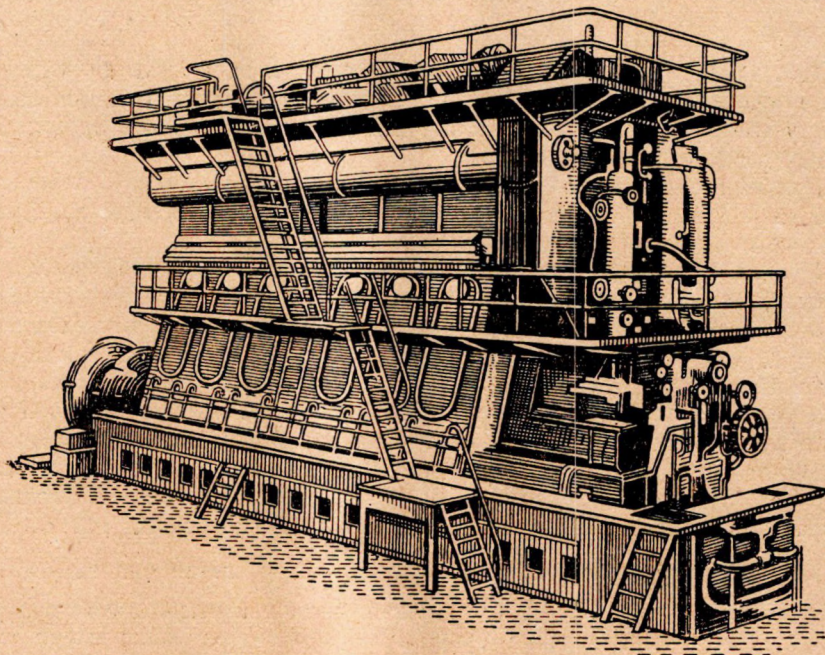


Рис. 214. Суднавы рухавік-дзель магутнасцю 3250 к. с.

Каб струмень газу атрымаў у рухавіку паскарэнне, неабходна мець ціск газу ў рухавіку большы, чым ціск навакольнага асяроддзя. Пад дзеяннем рознасці ціскаў струмень газу будзе бесперапынна выцякаць з рухавіка і ствараць рэактыўную цягу. Гэтага можна дабіцца шляхам бесперапыннага спальвання паліва ў рухавіку.

Рэактыўная цяга ўзнікае пры ўзаемадзеянні рухавіка і струменя, які ўтвараецца ў самім рухавіку, незалежна ад навакольнага асяроддзя. Значыць, калі толькі забяспечыць згаранне паліва ў рэактыўным рухавіку, ён будзе працаваць у высокіх, разрэджаных слаях атмасферы і нават у беспаветранай прасторы, г. зн. там, дзе вінта-маторная ўстаноўка працаваць не можа.

133. Асноўныя віды рэактыўных рухавікоў. Усе разнастайныя віды рэактыўных рухавікоў складаюцца з наступных асноўных частак:

1) бака з палівам, 2) камеры, дзе гэтае паліва згарае, 3) прыстасаванняў, якія забяспечваюць падачу паліва ў камеру згарання і выцячэнне прадуктаў згарання. У залежнасці ад віду выкарыстоўваемага паліва рэактыўныя рухавікі падзяляюцца на дзве вялікія групы: рухавікі на цвёрдым паліве і рухавікі на вадкім паліве.

Найпрасцейшым прыкладам рухавіка на цвёрдым паліве з'яўляецца парахавая ракета. У ракеце пры згаранні пораху ўтвараюцца газы, якія выкідваюцца з цела ракеты, ствараючы рэактыўную цягу.

У вадкасных рэактыўных рухавіках (ВРР) згараюць вадкія гаручыя рэчывы (нафтапрадукты, спірт і г. д.). Вадкасныя рэактыўныя рухавікі прымяняліся ў канцы другой сусветнай вайны для самалётаў-снарадаў далёкага дзеяння. Скорасць самалётаў-снарадаў дасягала $5400 \frac{\text{км}}{\text{гadz}}$ пры далёкасці палёту 320 км і вышыні траекторыі 100 км.

Да гэтага ж віду рухавікоў належыць ракетны рухавік для міжпланетных зносін, вынайздзены К. Э. Цыялкоўскім.

Вадкасны рэактыўны рухавік з'яўляецца рухавіком вялікіх скорасцей і вялікіх вышынь палёту, аднак ён расходую вельмі многа паліва. Напрыклад, самалёты-снарады, якімі гітлераўцы абстрэльвалі ў час другой сусветнай вайны Лондан, расходавалі ў секунду каля 130 кг гаручай сумесі.

Паколькі запас паліва на самалёце абмежаваны, то працягласць і далёкасць палёту рэактыўнага самалёта з вадкасным рухавіком невялікая. Акрамя таго, у такім рухавіку павінна быць зроблена спецыяльная камера, напоўненая рэчывам, якое акісляе гаручае, а гэта павялічвае размеры і вагу рухавіка. У паветрана-рэактыўным рухавіку—ПРР для акіслення гаручага выкарыстоўваецца кісларод непасрэдна з атмасферы, і, такім чынам, неабходнасць мець бак з запасам акісляльніка адпадае.

На рыс. 215 паказана схема паветрана-рэактыўнага праматочнага рухавіка. Яго работа працякае наступным чынам.

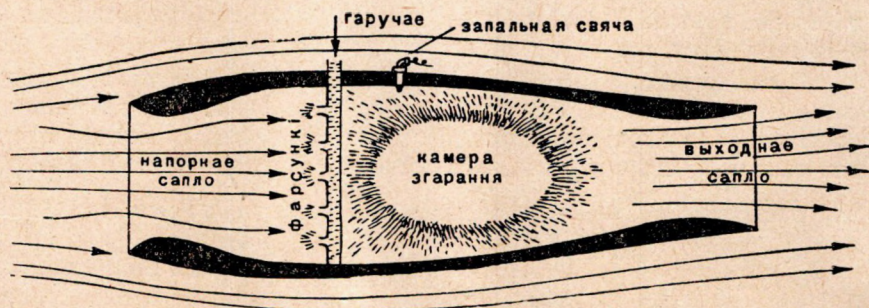
Пры палёце самалёта сустрэчны паток паветра праходзіць праз напорнае сапло і захоплівае гаручае, якое распыскваецца фарсункамі. Утварыўшаяся рабочая сумесь паступае далей у камеру згарання, дзе яна ўспальняецца пры дапамозе запальных свечэй.

Газы, якія атрымліваюцца ў выніку згарання рабочай сумесі, з велізарнай скорасцю выкідваюцца праз выходную адтуліну—сапло.

У выніку рэзкага павелічэння ціску пры згаранні сумесі скорасць газаў пры выхадзе з сапла намнога большая за скорасць уваходзячага ў рухавік паветра. Паводле закону захавання колькасці руху (гл. ч. I, § 55) для кошт гэтай рознасці скорасцей і ўтвараецца рэактыўная цяга.

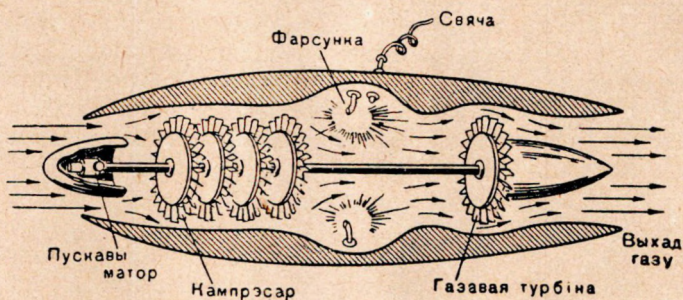
З пададзенага вынікае, што праматочны ПРР можа працаваць толькі тады, калі самалёт будзе ў руху. Ясна, што з такім рухавіком узлятаць самастойна самалёт не змога; для гэтага неабходны дадатковы рухавік.

У цяперашні час праматочныя ПРР яшчэ не атрымалі распаўсюджвання. Аднак у будучым перад імі раскрыюцца шырокія перспектывы, таму што яны з'яўляюцца эканамічна вельмі выгаднымі пры велізарных скорасцях палёту ($2000 - 3000 \frac{\text{км}}{\text{гадз}}$).



Рыс. 215. Схема праматочнага паветрана-рэактыўнага рухавіка.

У сучаснай авіяцыі шырокае распаўсюджванне атрымалі турбакампрэсарныя паветрана-рэактыўныя рухавікі, якія забяспечваюць і ўзлёт, і палёт самалёта. Схема будовы аднаго з відаў такога рухавіка дадзена на рыс. 216.



Рыс. 216. Схема турбакампрэсарнага рухавіка.

Для стварэння цягі пры ўзлёце самалёта неабходна прыстасаванне, якое забяспечвала б засасванне паветра ў камеру згарання. У турбакампрэсарных ПРР такім прыстасаваннем з'яўляецца газавая турбіна, звязаная з кампрэсарам. З рысунка відаць, што дыск турбіны сядзіць на адным вале з кампрэсарам. Калі турбіна пачынае працаваць, яна прыводзіць у рух кампрэсар. Апошні засасвае паветра і, сціснуўшы яго, падае ў камеру згарання. У астатнім усё адбываецца таксама, як у праматочным ПРР.

Прадукты згарання, праходзячы праз газавую турбіну, аддаюць ёй прыкладна палавіну сваёй энергіі, іх ціск і скорасць крыху памян-

шаюцца. Энергія, якая засталася, ідзе на павышэнне скорасці газаў у соплавай частцы рухавіка. З выходнага сапла вырываецца магутны газавы струмень, які стварае рэактыўную цягу.

Сучасны турбарэактыўны рухавік лягчэйшы за поршневы рухавік той жа магутнасці прыкладна ў пяць разоў. Пры скорасцях палёту ў $900-1000 \frac{\text{км}}{\text{год}}$ развіваемая ім магутнасць можа дасягаць $6500-7500$ к. с.

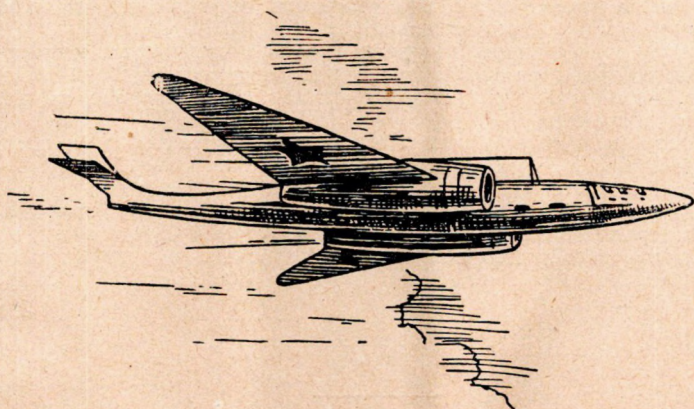


Рис. 217. Рэактыўны самалёт у палёце.

Аднак сучасныя турбарэактыўныя рухавікі яшчэ значна адстаюць ад поршневых па эканамічнасці і надзейнасці ў рабоце, а таксама па магутнасці на ўзлёце.

У цяперашні час у авіяцыі прымяняюцца таксама турбавінтавыя рухавікі.

У турбавінтавым рухавіку праходзячыя праз турбіну газы аддаюць ёй большую частку сваёй энергіі; таму газавая турбіна развівае магутнасць, якая значна перавышае тую, якая спажываецца кампрэсарам. Лішак магутнасці турбіны расходуюцца на прывядзенне ў вярчэнне паветранага вінта, які з'яўляецца асноўнай крывіцай цягі рухавіка. Акрамя таго, у турбавінтавых рухавіках атрымліваецца некаторая дадатковая цяга ад рэактыўнага дзеяння выходзячых з сапла адпрацаваўшых газаў.

Далейшае ўдасканаленне рэактыўных рухавікоў з'яўляецца адной з першачарговых задач сучаснай тэхнікі.

У Савецкім Саюзе даследчыкі і канструктары з поспехам працуюць над гэтай праблемай.

На рис. 217 паказан адзін з тыпаў самалёта з рэактыўным рухавіком.

Практыкаванне 33.

1. Вылічыць работу пары ў цыліндры паравой машыны пры наступных умовах: пара паступае ў цыліндр пры ціску 20 ат ; адсечка пары адбываецца на $\frac{1}{4}$ ходу поршня, $\frac{3}{4}$ ходу поршань перамяшчаецца за кошт расшырэння пары. У канцы ходу поршня пара мае ціск 2 ат . Плошча поршня 300 см^2 , даўжыня ходу 60 см . Пры разліках прыняць, што ціск пры расшырэнні газу спадае раўнамерна.
 2. Вызначыць работу пары ў паравым цыліндры, калі пара паступае ў цыліндр пры ціску 15 ат , адсечка пары адбываецца на $0,1$ ходу поршня; далейшы рух поршня да канца цыліндра ідзе пры расшырэнні пары да ціску $1,2 \text{ ат}$. Плошча поршня цыліндра 500 см^2 , ход поршня 60 см .
 3. Вызначыць тэарэтычную магутнасць паравой машыны па наступных даных: дыяметр поршня машыны 50 см , даўжыня ходу поршня 80 см , сярэдні ціск пары 12 ат . Лік абаротаў у мінуту 240 . (Указанне: пры ліку абаротаў 240 у мінуту рабочых ходаў 480 .)
 4. Вылічыць магутнасць чатырохтактнага нафтавага рухавіка з адным цыліндрам, калі дыяметр цыліндра 250 мм , ход поршня 300 мм і лік абаротаў у мінуту 300 . Сярэдні ціск 4 ат .
 5. Вызначыць магутнасць двухтактнага рухавіка, дыяметр цыліндра якога 300 мм , ход поршня 400 мм і лік абаротаў у мінуту 360 . Сярэдні ціск $4,5 \text{ ат}$.
 6. Вызначыць магутнасць чатырохтактнага рухавіка з чатырма цыліндрамі. Дыяметр цыліндра 200 мм , ход поршня 300 мм і лік абаротаў у мінуту 400 . Сярэдні ціск $7,5 \text{ ат}$.
-

АДКАЗЫ ДА ЗАДАЧ.

1. 1) $S = 120 \text{ м}$; $V = 50 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; 2) $S_1 \approx 7,1 \text{ м}$; $V \approx 14 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; 3) $5 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$;
4) $\approx 15 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. 3. 3) Шар большой массы будзе знаходзіцца на адлегласці 4 см ад
восі; меншай масы — на адлегласці 8 см; 4) $V \approx 8,9 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; $h = 20 \text{ м}$. 4. 1) $V_{\text{сек}} \approx$
 $\approx 0,084 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, $\omega_{\text{сек}} = 0,105 \frac{1}{\text{сек}}$; $V_{\text{мін}} \approx 0,0035 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, $\omega_{\text{мін}} \approx 0,0017 \frac{1}{\text{сек}}$;
 $V_{\text{задз}} \approx 0,00022 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$, $\omega_{\text{задз}} \approx 0,00015 \frac{1}{\text{сек}}$; 2) $\approx 10 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$; 3) $\omega = 0,00007 \frac{1}{\text{сек}}$;
 $V \approx 261 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. 5. 1) 625 мм; 2) $z_2 = 80$; $n_2 = 50 \frac{\text{об}}{\text{мін}}$; 3) 56,52 к. с.; 4) $\approx 176,4 \text{ кГ}$.
7. 2) $\approx 70,7 \text{ Г}$; 3) 50 гц; 4) 4 гц. 8. 1) $\approx 24,8 \text{ см}$; 2) $\approx 986 \frac{\text{см}}{\text{сек}^2}$; 3) $\approx 4 \text{ см}$, 9 см.
9. 3) 10 см; 4) $42^\circ 57'$. 12. 1) $\approx 1,2 \text{ сек}$; 2) 17 м; 3) 765 м; 4) $\approx 12 \text{ м}$; $\approx 8 \text{ см}$.
5) $\approx 3900 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$. 17. 2) 65° ; 3) 0,6 л; 4) 25 л; 5) $2 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \text{мін}}$. 18. 1) 8500 кал;
2) 8° ; 4) $16^\circ 8'$; 6) $\approx 0,12 \frac{\text{кал}}{\text{г. град}}$; 7) $0,09 \frac{\text{кал}}{\text{г. град}}$; 8) 650° ; 9) 439 ккал.
19. 1) 0,015 кГм; 3) 2 989 000 кГм; 4) $\approx 4,7 \text{ ккал}$; 5) $\approx 0,47 \text{ ккал}$; 6) $\approx 0,45 \text{ кг}$;
7) $\approx 165,6 \text{ т}$; 8) $\approx 21 \text{ кал}$; 9) $\approx 6775 \text{ кг}$. 20. 1) 0,012 м; 3) $\approx 0,000036$.
21. 1) 2 л; 2) 200 л; 3) 2,5 ат; 4) 2 ат; 5) $\approx 1,5$. 22. 3) $\approx 20 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$; 4) $p = 258 \text{ Г}$.
 $D = 0,01032 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; 5) $0,00258 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$. 23. 1) $\approx 6,82 \text{ л}$; 2) $\approx 649 \text{ см}^3$; 3) 273°C .
4) $\approx 109,1 \text{ л}$. 24. 2) $\approx 777 \text{ мм рт. сл.}$. 26. 2) $\approx 5,1 \text{ л}$; 3) $\approx 0,51 \text{ ат}$; 4) $\approx 2,09 \text{ л}$.
5) $\approx 605^\circ \text{,6K}$; 6) $D_t = D_0 \frac{p}{p_0(1 + \gamma t)}$. 27. 1) 30,2 см; 2) $\approx 73,6 \frac{\text{дн}}{\text{см}}$. 28. 1) $\approx 9 \text{ мм}$.
 $\approx 11,5 \frac{\text{кГ}}{\text{мм}^2}$; 2) 0,032 кГм. 29. 2) $\approx 8800 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2}$; 3) 62,8 кГ; 4) ≈ 4 ; $\approx 1,7$.
30. 1) 800 ккал; 2) 12 576 ккал; 3) 3638 ккал; 4) 196 ккал; 5) $\approx 79,8 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$;
6) 232 ккал. 31. 1) 639 ккал; 2) 61,9 ккал; 4) $537 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$; 5) 719 ккал; 6) 3741,5 ккал;
7) $\approx 14,7 \text{ кг}$. 32. 1) $\approx 93,5\%$; 65% ; $45,9\%$; 2) $\approx 8^\circ \text{C}$; 3) $\approx 75\%$; 4) паменшыцца.
да 43,4%; $\approx 0,4 \text{ м}^3$. 33. 1) 23 85 кГм; 2) 2637 кГм; 3) $\approx 2009,6 \text{ к. с.}$;
4) 19,6 к. с.; 5) 102 к. с.; 6) 125,6 к. с.

ЗМЕСТ

АДДЗЕЛ I. МЕХАНІКА (працяг).

Стар.

Раздзел I. Крывалінейны рух цём. Вярчальны рух.

1. Рух цела пад дзеяннем сілы, накіраванай пад вуглом да скорасці	3
2. Незалежнасць рухаў. Рух цела, кінутага гарызантальна	5
3. Рух цела, кінутага пад вуглом да гарызонта	7
4. Раўнамерны рух па акружнасці. Вуглавая скорасць. Перыяд абарачэння	9
5. Лінейная скорасць. Сувязь паміж вуглавой і лінейнай скорасцямі	11
6. Дацэнтрабежнае паскарэнне	12
7. Дацэнтрабежная сіла	14
8. Прыклады дзеяння дацэнтрабежнай сілы	15
9. Трэці закон Ньютана ў прымяненні да руху цёл па акружнасці	21
10. Адцэнтрабежныя механізмы	22
11. Вярчальны рух цвёрдых цёл	23
12. Тахометр	24
13. Сілы, дзеючыя на цвёрдае цела, якое верціцца вакол восі	26
14. Перадача вярчэння ад рухавіка да машыны-прылады	—
15. Раменная перадача	27
16. Фрыкцыйная перадача	28
17. Зубчастая перадача	29

Раздзел II. Ваганні і хвалі.

18. Перыядычны рух	33
19. Гарманічнае (простае) ваганне	—
20. Частата і амплітуда вагання. Перыяд вагання	35
21. Ваганні пад дзеяннем сілы цяжару	36
22. Законы вагання матэматычнага маятніка	37
23. Графічны запіс вагальнага руху	39
24. Фаза ваганняў. Зрушэнне фаз	40
25. Перагварэнні энергіі пры ваганнях маятніка	42
26. Затухаючыя ваганні	44
27. Скарыстанне маятніка ў гадзінніку	45
27а. Складанне гарманічных вагальных рухаў	46
28. Вимушаныя ваганні	47
29. Рэзананс	48
30. Значэнне рэзанансу ў тэхніцы	50
31. Хвалевы рух. Утварэнне папярочных хваль	51
32. Паддоўжныя хвалі	54
33. Даўжыня хвалі і скорасць распаўсюджвання хваль	55

Раздзел III. Гук.

34. Паходжанне гуку	57
35. Просты від гукавых ваганняў	58
36. Класіфікацыя гукаў	—
37. Распаўсюджванне гукаў	59
38. Скорасць распаўсюджвання гуку	60
39. Музычныя гукі. Вышыня тону	61
40. Сіла і гучнасць гуку	62
41. Тэмбр гуку	64
42. Адбіццё гукавых хваль	65
43. Стаячыя хвалі	66
44. Назіранне гукавых стаячых хваль	67
45. Гукавы рэзананс і рэзанатары	68
46. Фізіка вуха	70
47. Запіс і ўзнаўленне гуку	71

Раздзел IV. Рух вадкасці і газу.

48. Ціск. Сіла ціску	73
49. Назіранне руху вадкасці	74
50. Стацыянарны рух вадкасці	75
51. Ціск у рухаючайся вадкасці	76
52. Усасваючае дзеянне струменя вадкасці і яго практычнае выкарыстанне	78
53. Унутранае трэнне ў вадкасцях і газах	81
54. Супраціўленне пры руху цела ў вадкасці і газе	82
55. Абцягванне цела вадкасцю або газам	84
56. Пад'ёмная сіла	85
57. Выкарыстанне энергіі рухаючайся вады	88
58. Гідраўлічныя рухавікі	89
59. Ветраныя рухавікі	92

АДДЗЕЛ II. МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА І ЦЕПЛЫНЯ.

Раздзел V. Асновы малекулярна-кінетычнай тэорыі будовы рэчыва.

60. Развіццё малекулярна-кінетычнай тэорыі	95
61. Броўнаўскі рух	96
62. Дыфузія	98
63. Аб зямной атмасферы	99
64. Доследы, якія тлумачацца малекулярна-кінетычнай тэорыяй	100
65. Лік малекул у адзінцы аб'ёму рэчыва. Размеры малекул	101
66. Скорасць руху малекул	102
67. Лік сутыкненняў і сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул	103
68. Сіла ўзаемадзеяння паміж малекуламі	104
69. Цеплавы рух. Тэмпература	106

Раздзел VI. Цеплыня і работа.

70. Энергія руху і ўзаемадзеяння малекул. Унутраная энергія цел	108
71. Змяненне ўнутранай энергіі цела	—
72. Адзінка колькасці цеплыні	109
73. Пяніцце аб цеплаёмкасці цела. Удзельная цеплаёмкасць рэчыва	110
74. Вымярэнне ўдзельнай цеплаёмкасці	111
75. Развіццё поглядаў на прыроду цеплыні	113
76. Механчны эквівалент цеплыні	114
77. Закон захавання і ператварэння энергіі	117

Раздел VII. Цеппавое расшырэне цвёрдых і вадкіх цел

78. Залежнасць аб'ёму цел ад тэмпературы	119
79. Лінейнае расшырэне цвёрдых цел	—
80. Аб'ёмнае расшырэне цвёрдых цел	120
81. Улік цеппаваго расшырэння ў тэхніцы	121
81а. Тэрмарэгулятар	122
82. Цеппавое расшырэне вадкасцей	123

Раздел VIII. Уласцівасці газаў.

83. Ціск газаў	125
84. Залежнасць паміж аб'ёмам і ціскам газу. Закон Бойля — Марыёта	—
85. Залежнасць паміж шчыльнасцю газу і яго ціскам	128
86. Залежнасць аб'ёму газу ад тэмпературы. Закон Гей-Люсака	129
87. Залежнасць ціску газу ад тэмпературы. Закон Шарля	131
88. Абсалютная шкала тэмператур	134
89. Залежнасць паміж аб'ёмам, ціскам і тэмпературай газу. Аб'яднаны закон газавага стану	135
90. Фізічная сутнасць паняцця абсалютнага нуля	137
91. Змяненне тэмпературы газу пры хуткім расшырэнні і сцісканні	—
92. Прымяненне сціснутых газаў	138

Раздел IX. Уласцівасці вадкасцей.

93. Малекулярны рух у вадкасцях	142
94. Паверхневае нацяжэнне	143
95. Каэфіцыент паверхневага нацяжэння	144
96. Змочванне	146
97. Капілярнасць	148

Раздел X. Уласцівасці цвёрдых цел.

98. Крышталічныя і аморфныя целы	151
99. Прасторавыя рашоткі	152
100. Дэфармацыя цвёрдых цел	154
101. Пругкасць і пластычнасць	155
102. Віды дэфармацый	156
102а. Цвёрдасць	159
102б. Закон Гука	160
103. Трываласць. Запас трываласці	162
103а. Значэнне ўласцівасцей матэрыялаў для іх апрацоўкі і прымянення	164

Раздел XI. Змяненне агрэгатнага стану рэчыва.

104. Плаўленне цел	166
105. Удзельная цеплыня плаўлення	168
106. Змяненне аб'ёму цел пры плаўленні і зацвердзяванні	169
107. Ліццё металаў	170
108. Сплавы і іх прымяненне ў тэхніцы	172
109. Выпарэнне	173
110. Ахаладжэнне пры выпарэнні	174
111. Насычаючая пара	175
112. Ціск насычаючай пары	—
113. Незалежнасць ціску і шчыльнасці насычаючай пары ад яе аб'ёму	176
114. Ненасычаючая пара	177
115. Кіпенне	178
116. Удзельная цеплыня параўтварэння	180

117. Вільготнасць паветра	182
118. Спосабы вызначэння вільготнасці паветра	183
119. Валосны гігрометр	—
120. Псіхрометр Аўгуста	184
121. Крытычная тэмпература	185
122. Звадкаванне газаў	187
123. Уласцівасці звадкаваных газаў	189

Раздзел XII. Цеплавая рухавікі.

124. Работа пры расшырэнні газу	190
125. Цеплавая рухавік. Умовы, неабходныя для работы цеплага рухавіка	—
126. Каэфіцыент карыснага дзеяння цеплавых рухавікоў	192
127. Паравая машына	193
128. Паравыя катлы	198
129. Паравыя турбіны	199
130. Рухавік унутранага згарання	202
131. Рухавік унутранага згарання — дызель	206
132. Рэактыўныя рухавікі	209
133. Асноўныя віды рэактыўных рухавікоў	210

На беларусском языке
Александр Васильевич Пёрышкин

Курс физики
для 9-го класса средней школы

Государственное
учебно-педагогическое издательство
Министерства просвещения БССР
Минск, проспект имени Сталина, 105

Рэдактар *І. І. Цукерман*
Тэхрэдактар *А. І. Сасіновіч*
Карэктар *Е. І. Бруцэвіч*

Здадзена ў набор 29/XI 1957 г. Падпісана да друку 19/III 1958 г.
Тыраж 20 000 экз. Папера 60 × 92¹/₁₆. Пап. арк. 6,875. Друк. арк. 13,75.
Уч.-выд. арк. 13,87. Цана кнігі 1 руб. 80 кап. Пераплёт 75 кап. Зак. 840.

Друкарня імя Сталіна, Мінск, праспект імя Сталіна, 105.



И
И
И
И
И
И

И
И
И
И
И
И



И
И
И
И
И
И



ЧАСТКА

И



Цена 2 руб. 55 кап.