

# ЗБОРНИК ЗАДАЧ

ПА КУРСЕ

АГУЛЬНАЙ ФІЗИКІ

# ЗБОРНИК ЗАДАЧ

## ПА КУРСЕ АГУЛЬНАЙ ФІЗІКІ

Дарушчана  
Міністэрствам адукацыі Рэспублікі Беларусь  
у якасці вучэбнага дапаможніка  
для студэнтаў педагагічных інстытутаў  
па спецыяльнасці 01.04 Фізіка

Мінск  
„Вышэйшая школа”  
1993

ББК 22.3я73

З-41

УДК 53(076.1) (075.8)

Аўтары:

М.С.Цэдык, А.С.Мікуліч, І.Ф.Савіцкая, Г.А.Загуста, Г.П.Макеева

Пераклад зроблены аўтарамі па выданні: Сборник задач по курсу общей физики : Учеб. пособие для студентов пед. ин-тов по спец. № 2105 «Физика» / Г.А.Загуста, Г.П.Макеева, Л.С.Микulich и др. — М.: Просвещение, 1989. — 271 с.: ил.

Рэцэнзенты:

кафедра фізікі Архангельскага педагагічнага інстытута імя М.В. Ламаносава; прафесар кафедры агульнай фізікі МІФІ І.Е.Ірадаў

З-41 Зборнік задач па курсе агульнай фізікі: Вучэб. дапам. / М.С.Цэдык, А.С.Мікуліч, І.Ф. Савіцкая і інш.; Пад агул. рэд. М.С. Цэдыка. — Мн.: Выш. шк., 1993. — 276 с: іл.

ISBN 5-339-00839-8 (беларус.).

Дапаможнік змяшчае задачы па ўсіх раздзелах агульнай фізікі ў адпаведнасці з дзеючай праграмай для педагагічных інстытутаў.

Для студэнтаў педагагічных інстытутаў і вышэйшых тэхнічных навучальных устаноў, а таксама для выкладчыкаў дысцыплін.

3  $\frac{1604010000-037}{М304(03)-93}$  17-93

ББК 22.3я73

ISBN 5-09-000627-X  
ISBN 5-339-00839-8 (беларус.)

© Издательство «Просвещение», 1989  
© Пераклад. Калектыў аўтараў, 1993

## ПРАДМОВА

---

Адным з фактараў, якія забяспечваюць паляпшэнне якасці падрыхтоўкі настаўнікаў фізікі для сярэдніх агульнаадукацыйных школ, з'яўляецца засваенне студэнтамі педагагічных інстытутаў тэарэтычных ведаў па курсу фізікі і ўменне прымяняць іх у практычнай дзейнасці. Развіццю практычных навыкаў садзейнічае рашэнне задач. Веды і ўменні, атрыманыя студэнтамі пры рашэнні задач, якія змешчаны ў «Зборніку задач па курсу агульнай фізікі», можна выкарыстоўваць у іх далейшай педагагічнай дзейнасці.

Гэты дапаможнік з'яўляецца перакладам на беларускую мову «Сборника задач по курсу общей физики», падрыхтаванага выдавецтвам «Просвещение» ў 1989 г.

Дапаможнік змяшчае задачы па ўсіх раздзелах курса агульнай фізікі ў адпаведнасці з дзеючай праграмай. Дастаткова шырокі выбар задач як па тэматыцы, так і па ступені цяжкасці дае магчымасць выкарыстоўваць яго і для фізічных, і для матэматычных спецыяльнасцей педагагічных інстытутаў. Для зручнасці і эканоміі часу студэнтаў у пачатку кожнага параграфа даюцца кароткія тэарэтычныя звесткі з указаннем асноўных законаў і формул, якія выкарыстоўваюцца пры рашэнні задач. Формулы прыведзены без падрабязных тлумачэнняў, бо маецца на ўвазе, што сэнс велічынь, якія ўваходзяць у іх, ужо вядомы студэнту, які прыступіў да рашэння задач. У канцы «Зборніка» змешчаны адказы да задач, рашэнні найбольш складаных задач, а таксама ўсе неабходныя даведачныя звесткі.

«Зборнік задач па курсу агульнай фізікі» падрыхтавалі: А.С. Мікуліч — § 1—6, 8—10, 21—23; І.Ф. Савіцкая — § 11—16; Г.А. Загуста — § 17—20; Г.П. Макеева — § 24—30; М.С. Цэдрык — § 7, 31—36, прадмову і дадатак.

У працэсе перакладу дапаможнік у асноўным захаваў сваю структуру. Пры гэтым зроблена частковая перакампаановка матэрыялу ў оптыцы і квантавай фізіцы, а таксама ўключаны новыя задачы. Частка задач заменена на больш цікавыя і грунтоўныя. У некаторых задачах лікавыя дадзеныя перанесены ў тэбліцы дадатку, зроблены неабходныя ўдакладненні, выпраўленні і дапаўненні.

Аўтары выказваюць шчырую падзяку прафесару кафедры агульнай фізікі Маскоўскага інжынерна-фізічнага інстытута І.Е. Ірадаву, калектыву кафедры фізікі Архангельскага педагагічнага інстытута імя М.В. Ламаносава і яе загадчыку дацэнту А.Н. Сураўцаву, супрацоўнікам кафедры агульнай фізікі Мінскага педагагічнага інстытута імя А.М. Горкага, дацэнту Маскоўскага дзяржаўнага педагагічнага ўніверсітэта імя У.І. Леніна



Ю.Н. Пашыну, якія выканалі вялікую працу па рэцэнзаванні рукапісу. Крытычныя заўвагі рэцензентаў спрыялі паляпшэнню якасці рукапісу і ўлічаны аўтарскім калектывам пры канчатковай яго дапрацоўцы.

Заўвагі і прапановы просім дасылаць на адрас: 220048, Мінск, праспект Машэрава, 11, выдавецтва «Вышэйшая школа».

*М.С.Цэдык*

# Раздзел I

## МЕХАНІКА

### § 1. КІНЕМАТЫКА

Сярэдняя скорасць пункта

$$\langle v \rangle = \Delta \vec{r} / \Delta t,$$

дзе  $\Delta \vec{r}$  — прырашчэнне радыуса-вектара  $\vec{r}(t) = \vec{i}x(t) + \vec{j}y(t) + \vec{k}z(t)$  за час  $\Delta t$ ;  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  — адзінкавыя вектары (орты) восей прамавугольнай сістэмы каардынат;  $x(t), y(t), z(t)$  — каардынаты пункта.

Імгненая скорасць

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

Модуль скорасці

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} = \frac{ds}{dt},$$

дзе  $ds$  — шлях, пройдзены пунктам за час  $dt$ .

Закон складання скорасцей Галілея

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0,$$

дзе  $\vec{v}$  — скорасць матэрыяльнага пункта ва ўмоўна нерухомай сістэме каардынат (абсалютная скорасць);  $\vec{v}'$  — яго скорасць у рухомай сістэме каардынат (адносная скорасць);  $\vec{v}_0$  — скорасць рухомай сістэмы каардынат адносна нерухомай (пераносная скорасць).

Сярэдняе паскарэнне пункта

$$\langle \vec{a} \rangle = \Delta \vec{v} / \Delta t,$$

дзе  $\Delta v$  — прырашчэнне скорасці за час  $\Delta t$ .

Імгненнае паскарэнне

$$a = \lim_{\Delta t} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

Модуль паскарэння

$$a = |\vec{a}| = \sqrt{\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2y}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2z}{dt^2}\right)^2}.$$

Поўнае паскарэнне пры прамалінейным руху

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau = \vec{n} \frac{v^2}{R} + \vec{\tau} \frac{dv}{dt},$$

дзе  $\vec{a}_n$  і  $\vec{a}_\tau$  — нармальнае і тангенцыяльнае паскарэнні адпаведна;  $\vec{n}$  і  $\vec{\tau}$  — адзінкавыя вектары ў напрамках галоўнай нармалі і датычнай да траекторыі адпаведна,  $R$  — радыус крывізны траекторыі.

Напрамак вектара поўнага паскарэння вызначаецца суадносінай

$$\operatorname{tg} \alpha = a_n / a_\tau .$$

дзе  $\alpha$  — вугал паміж вектарамі поўнага паскарэння і скорасці.

Вуглавая скорасць і вуглавое паскарэнне пры вярчальным руху

$$\vec{\omega} = d\vec{\varphi}/dt; \quad \vec{\varepsilon} = d\vec{\omega}/dt .$$

Сувязь лінейнай і вуглавой скорасці

$$\vec{v} = [\vec{\omega}, \vec{r}] ,$$

дзе  $\vec{r}$  — радыус-вектар разглядаемага пункта адносна любога пункта восі вярчэння.

Сувязь вуглавой скорасці з перыядам  $T$  і частатой вярчэння  $n$

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

Нармальнае і тангенцыяльнае паскарэнне пункта цела, якое верціцца раўнамерна,

$$a_n = \omega^2 R; \quad a_\tau = \varepsilon R ,$$

дзе  $R$  — адлегласць ад разглядаемага пункта цела да восі вярчэння.

Ураўненне гарманічных ваганняў і яго рашэнне:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0; \quad x = A \cos(\omega_0 t + \varphi) ,$$

дзе  $x$  — зрушэнне;  $A$  — амплітуда;  $\omega_0$  — уласная частата ваганняў;  $\varphi$  — пачатковая фаза.

Пры складанні двух аднолькава накіраваных гарманічных ваганняў адной і той жа частаты

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1); \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

амплітуда і фаза складанага вагання вызначаюцца суадносінамі:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1);$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} .$$

Частата біцця пры складанні гарманічных ваганняў з частотамі  $\nu_1$  і  $\nu_2$

$$\nu = |\nu_1 - \nu_2| .$$

## Прамалінейны рух

1.1. У якім выпадку пройдзены матэрыяльным пунктам шлях і модуль вектара перамяшчэння супадаюць?

1.2. Каардынаты матэрыяльнага пункта змяняюцца з цягам часу па закону  $x = 4t$ ,  $y = 3t$ ,  $z = 0$ . Знайсці залежнасць пройдзенага пунктам шляху ад часу, адлічваючы шлях ад пачатковага становішча пункта.

1.3. Першую чвэрць шляху матацыкліст праехаў са скорасцю  $v_1 = 10$  м/с, другую — са скорасцю  $v_2 = 15$  м/с, трэцюю — са скорасцю  $v_3 = 20$  м/с і апошнюю — са скорасцю  $v_4 = 5,0$  м/с. Вызначыць сярэднюю скорасць матацыкліста на ўсім шляху.

1.4. Знайсці сярэднюю скорасць руху аўтамабіля, калі вядома, што  $1/4$  частку часу ён рухаўся са скорасцю  $16$  м/с, а ўвесь астатні час са скорасцю  $8$  м/с.

1.5. Пасажыр электрацягніка, які рухаецца са скорасцю  $15 \text{ м/с}$ , заўважыў, што сустрэчны цягнік даўжынёй  $210 \text{ м}$  прайшоў міма яго за  $6,0 \text{ с}$ . Вызначыць скорасць сустрэчнага цягніка.

1.6. Вызначыць скорасць веласіпедыста і пешахода, калі вядома, што пры руху іх у адным напрамку за кожную мінуту пешаход адстае ад веласіпедыста на адлегласць  $s_1 = 210 \text{ м}$ , а калі яны рухаюцца насустрач адзін аднаму (пры нязменных модулях скорасці), то за кожныя  $2 \text{ мін}$  адлегласць паміж імі змяншаецца на  $s_2 = 780 \text{ м}$ .

1.7. Па нерухомым эскалатары метро пасажыр падымаецца за  $t_1 = 120 \text{ с}$ , а па рухомым пры той жа скорасці адносна прыступак за  $t_2 = 30 \text{ с}$ . Вызначыць час пад'ёму пасажыра, калі ён стаіць нерухома на эскалатары, які рухаецца.

1.8. Маторная лодка плыве па рацэ з аднаго пункта ў другі і назад. У колькі разоў час руху лодкі супраць цячэння большы за час руху па цячэнні, калі скорасць цячэння  $v_1 = 2,0 \text{ м/с}$ , а скорасць лодкі адносна вады  $v_2 = 10 \text{ м/с}$ ?

1.9. Вызначыць скорасць маторнай лодкі адносна вады, калі пры руху па цячэнні ракі яе скорасць  $10 \text{ м/с}$ , а пры руху супраць цячэння  $6,0 \text{ м/с}$ . Чаму роўная скорасць цячэння вады ў рацэ?

1.10. Вызначыць працягласць палёту самалёта паміж двума пунктамі, якія знаходзяцца на адлегласці  $1000 \text{ км}$ , калі скорасць сустрэчнага ветру  $v_1 = 25 \text{ м/с}$ , а сярэдняя скорасць самалёта адносна паветра  $v_2 = 250 \text{ м/с}$ . Чаму роўны час палёту самалёта пры спадарожным ветры?

1.11. Вызначыць скорасць сустрэчнага ветру, калі пры руху аўтобуса са скорасцю  $v_1 = 15 \text{ м/с}$  кроплі дажджу ўтвараюць на аконным шкле палосы пад вуглом  $\alpha = 30^\circ$ . Вертыкальная складаючая скорасці кропель  $v_2 = 10 \text{ м/с}$ .

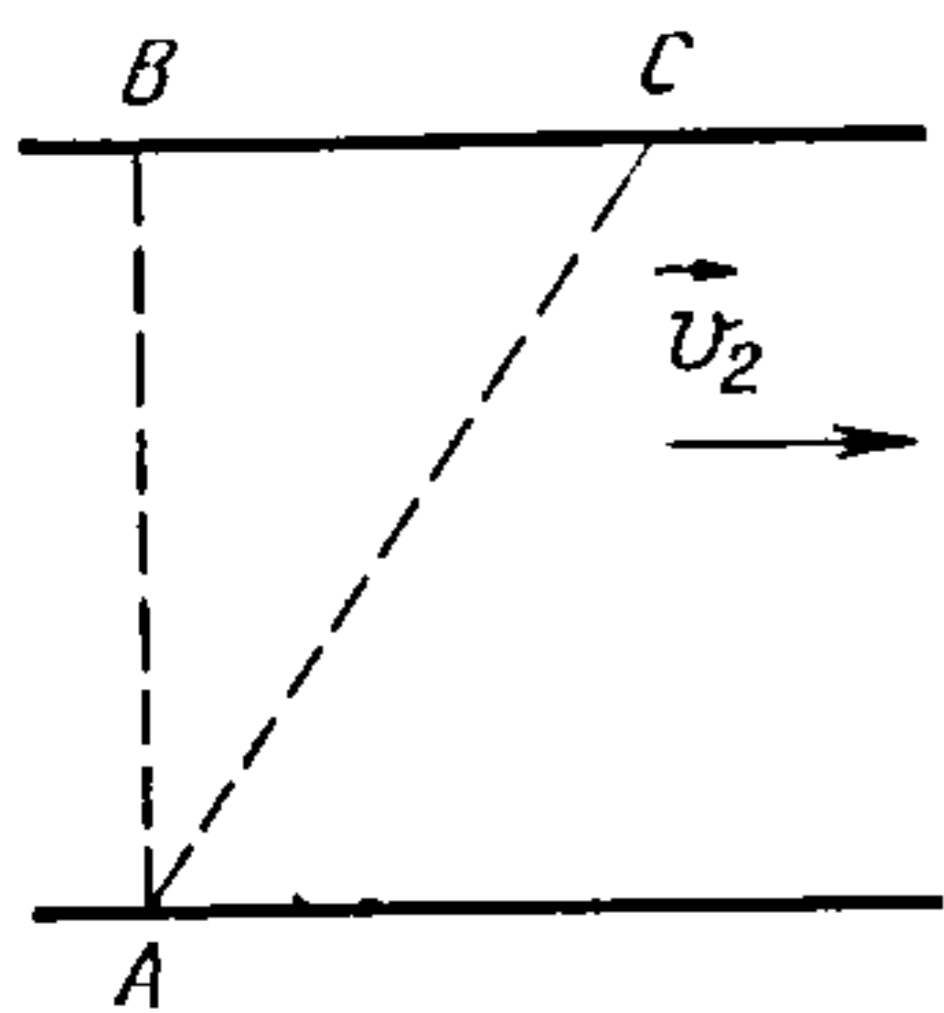
1.12. Вызначыць час палёту самалёта паміж двума пунктамі, якія знаходзяцца на адлегласці  $500 \text{ км}$  адзін ад аднаго, калі скорасць самалёта адносна паветра  $v_1 = 100 \text{ м/с}$ , а скорасць сустрэчнага ветру, накіраванага пад вуглом  $30^\circ$  да напрамку руху,  $v_2 = 30 \text{ м/с}$ .

1.13. З якой найбольшай скорасцю павінен ісці пад дажджом чалавек, каб дождж не пападаў на ногі, калі ён трымае парасон на вышыні  $2,0 \text{ м}$  і край парасона выступае ўперад на  $0,30 \text{ м}$ ? Кроплі дажджу падаюць вертыкальна са скорасцю  $8,0 \text{ м/с}$ .

1.14. Турбарэактыўны самалёт за  $1,5$  гадзіны палёту пераадолеў адлегласць  $700 \text{ км}$ . Вызначыць скорасць ветру, калі яго напрамак складае вугал  $\alpha = 90^\circ$  з напрамкам руху самалёта, скорасць якога адносна паветра  $200 \text{ м/с}$ .

1.15. Дзве падводныя лодкі плывуць насустрач адна адной кожная са скорасцю  $v$ . З першай лодкі быў пасланы ультрагукавы сігнал, які адбіўся ад другой лодкі і вярнуўся назад праз час  $t$ . Скорасць сігналу  $c$ . На якой





Рыс. 1.1

адлегласці знаходзіліся лодкі ў той момант, калі быў пасланы сігнал?

1.16. Два лодачнікі павінны пераадолець раку з пункта  $A$  ў пункт  $B$  (рыс. 1.1). Адзін з іх накіраваў лодку па прамой  $AB$  і ў выніку аказаўся ў пункце  $C$  процілеглага берага. Каб дасягнуць пункта  $B$ , ён рухаўся супраць цячэння ўздоўж берага. Другі лодачнік накіраваў лодку так, што адразу трапіў у пункт  $B$ . Які з іх трапіў у пункт  $B$  хутчэй і ў колькі разоў, калі скорасць лодкі адносна вады ў абодвух выпадках ад-

нолькавая і роўная  $v_1 = 20$  м/с, а скорасць цячэння вады  $v_2 = 1,2$  м/с? Скорасць цячэння вады каля берагоў і ў сярэдзіне ракі лічыць аднолькавай.

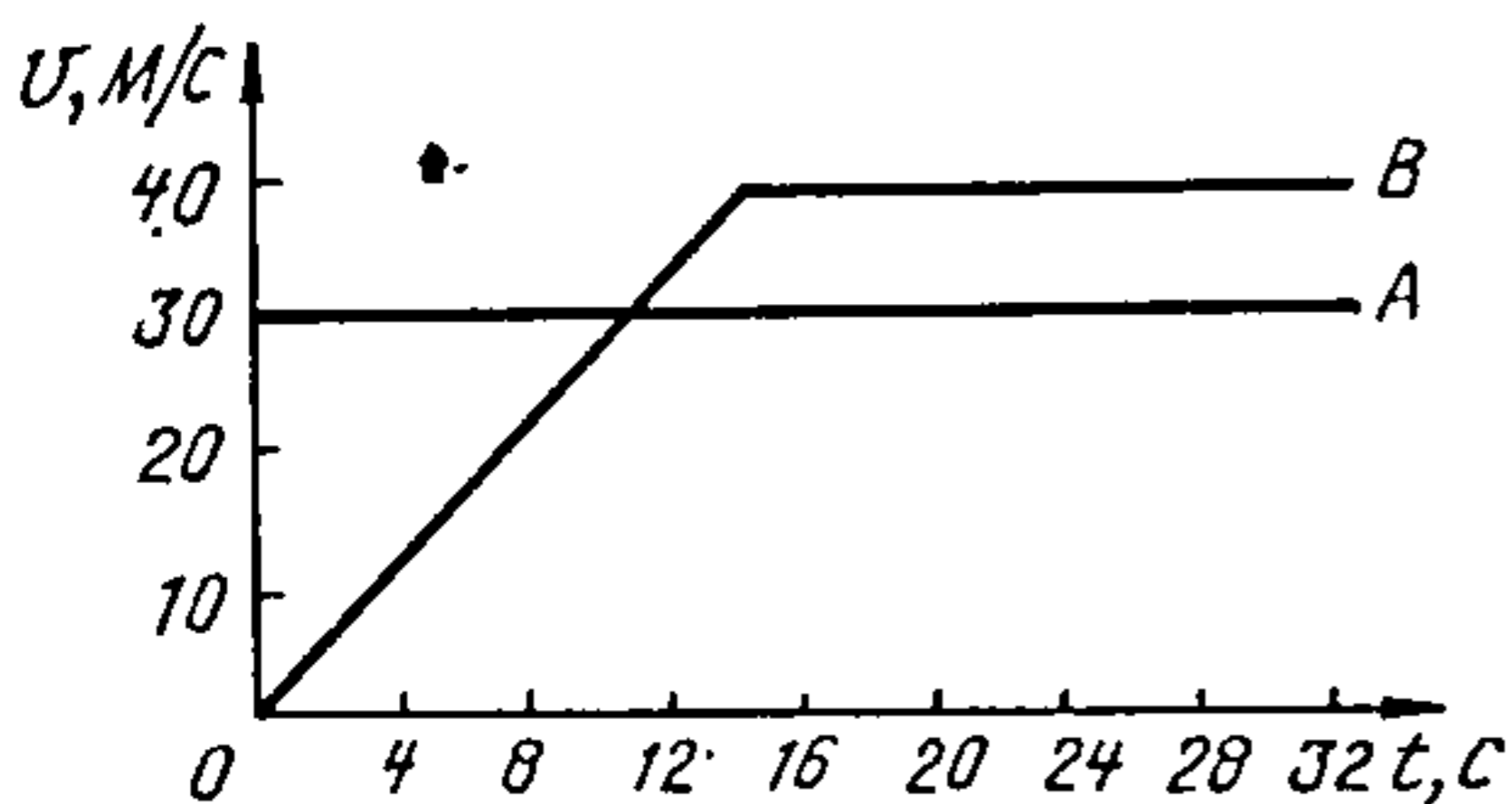
1.17. Рух матэрыяльнага пункта зададзены ўраўненнем  $x = at + bt^2 + ct^3$ , дзе  $a = 5,0$  м/с,  $b = 0,20$  м/с<sup>2</sup>,  $c = 0,10$  м/с<sup>2</sup>. Вызначыць скорасць матэрыяльнага пункта ў момант часу  $t_1 = 2,0$  с і  $t_2 = 4,0$  с, а таксама сярэдняю скорасць за прамежак часу ад  $t_1$  да  $t_2$ .

1.18. Вызначыць траекторыю руху пункта, зададзенага ўраўненнямі:  $x = 4t^2 + 2$ ;  $y = 6t^2 - 3$ ,  $z = 0$ . Пабудаваць графік залежнасці шляху, пройдзенага пунктам, ад часу.

1.19. Рух матэрыяльнага пункта зададзены ўраўненнямі:  $x = 8t^2 + 4$ ;  $y = 6t^2 - 3$ ,  $z = 0$ . Вызначыць модулі скорасці і паскарэння пункта ў момант часу  $t = 10$  с.

1.20. Які шлях пройдзе цела за час  $t = 10$  с ад пачатку руху, калі ўраўненні яго руху  $x = 2t^2 + 3t + 4$ ,  $y = 3t^2 + 4t - 2$ ,  $z = 0$ ?

1.21. На рыс. 1.2 паказаны графікі скорасцей двух цел  $A$  і  $B$ , якія рухаюцца прамалінейна; каардынаты іх у пачатковы момант часу  $t = 0$  супадаюць. Праз які час іх перамяшчэнні супадуць?



Рыс. 1.2

1.22. Прамалінейны рух пункта апісваецца ўраўненнем  $\vec{r} = 3t^2\vec{i} + 4t^2\vec{j} + 8t\vec{k}$ . Вызначыць шлях, пройдзены пунктам за першыя 4 с руху.

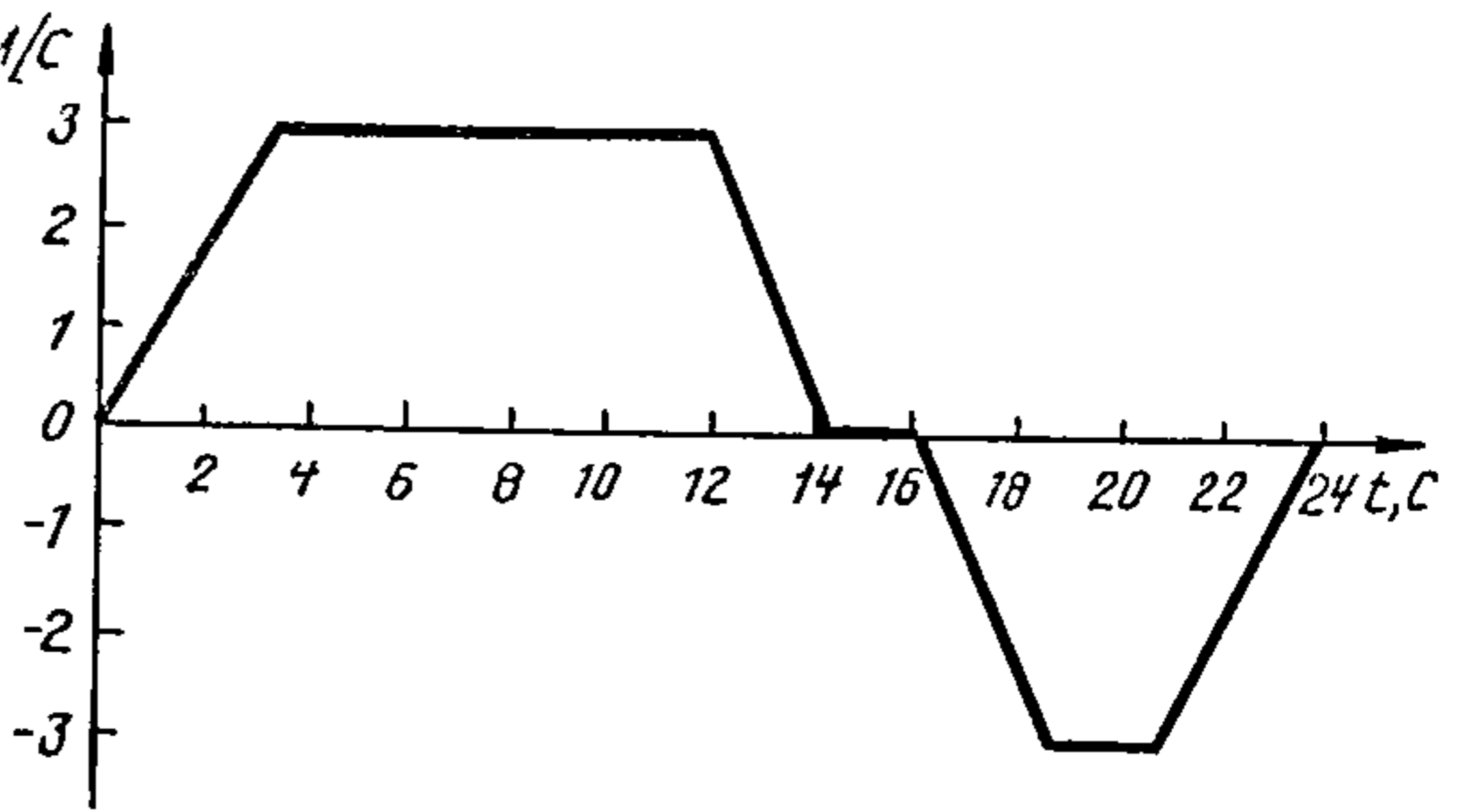
1.23. Скорасць матэрыяльнага пункта, які рухаецца ўздоўж восі  $X$ , вызначаецца ўраўненнем  $v_x = 0,2 - 0,1t$ . Знайсці каардынату пункта ў момант часу  $t = 10$  с, калі ў пачатковы момант часу ён знаходзіўся ў пункце  $x_0 = 1$ .

1.24. На рыс. 1.3 паказаны графік залежнасці вертыкальнай праекцыі скорасці руху кабіны ліфта ад часу. Вызначыць перамяшчэнне кабіны і пройдзены ёю шлях. Пабудаваць графік залежнасці паскарэння кабіны ад часу.

1.25. Самалёт для ўзлёту павінен мець скорасць 100 м/с. Вызначыць час

разбегу і паскарэнне, калі даўжыня разбегу 600 м. Рух самалёта лічыць роўнапаскораным.

1.26. Аўтамабіль рухаецца са скорасцю  $v_1 = 25$  м/с. На шляху  $s = 40$  м праводзіцца тармажэнне, пасля чаго скорасць змяншаецца да  $v_2 = 15$  м/с. Лічачы рух аўтамабіля роўназапа-  
 леным, знайсці модуль паскарэння і час тармажэння.



Рыс. 1.3

1.27. Цела рухаецца роўнапаскорана і праходзіць аднолькавыя сумежныя адрэзкі шляху даўжынёй  $s = 15$  м адпаведна за  $t_1 = 2,0$  с і  $t_2 = 1,0$  с. Вызначыць модулі паскарэння і скорасці цела ў пачатку першага адрэзку шляху.

1.28. Вызначыць шлях, пройдзены целам, якое рухаецца па прамалінейнай траекторыі на працягу 10 с, калі яго скорасць змяняецца па закону  $v = 30 + 2t$ . У момант часу  $t_0 = 0$ ,  $s = 0$ .

1.29. У капры для забіўкі паляў груз раўнамерна падымаецца на вышыню 4,9 м за 5 с, пасля чаго адразу падае на палю. Вызначыць, колькі ўдараў ён робіць за 1 мін.

1.30. Вызначыць час пад'ёму ліфта ў высотным будынку, калі яго рух пры разгоне і тармажэнні роўнапераменны з паскарэннем  $a = 1,0$  м/с<sup>2</sup>, а на сярэднім участку — раўнамерны са скорасцю  $v = 2,0$  м/с. Вышыня пад'ёму  $h = 60$  м.

1.31. Вызначыць пачатковую скорасць цела, кінутага вертыкальна ўверх, калі пункт, які знаходзіцца на вышыні 60 м, яго праходзіла 2 разы з прамежкам часу 4,0 с. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

1.32. Цела, кінутае вертыкальна ўніз з пачатковай скорасцю 19,6 м/с, за апошнюю секунду прайшло  $n = 1/4$  частку ўсяго шляху. Вызначыць час падзення цела і яго канчатковую скорасць. З якой вышыні кінута цела?

1.33. Цела кінута вертыкальна ўверх з пачатковай скорасцю 21 м/с. Вызначыць час паміж двума момантамі праходжання целам меткі паловы максімальнай вышыні. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

1.34. На вертыкальна падвешанай тонкай нітцы замацавана  $n$  свінцовых шарыкаў так, што ніжні шарык амаль дакранаецца да падлогі. Калі верхні канец ніткі адпускаецца, шарыкі адзін за адным падаюць на падлогу. Як павінны суадносіцца адлегласці паміж шарыкамі і адлегласці ад шарыкаў да падлогі, каб удары былі чутны праз аднолькавыя прамежкі часу?

1.35. Вызначыць пачатковую скорасць, якую неабходна надаць целу,



кінутаму вертыкальна ўверх, каб яно вярнулася назад праз  $t = 6$  с. Чаму роўная максімальная вышыня пад'ёму? Супраціўленне паветра не ўлічваць.

1.36. Часцінка рухаецца з паскарэннем  $\vec{a} = 2t\vec{i} + 4t\vec{j} + 3\vec{k}$ . Вызначыць модуль скорасці часцінкі ў момант часу  $t = 2$  с, калі ў пачатковы момант часу  $t = 0$  яе скорасць была  $\vec{v}_0 = 3\vec{i} + 1\vec{j} + 1\vec{k}$ .

1.37. На нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 30^\circ$  ляжыць цела. Якое мінімальнае гарызантальнае паскарэнне неабходна надаць нахільнай плоскасці, каб ляжачае на ёй цела свабодна падала?

### Крывалінейны рух

1.38. Якая траекторыя пункта, калі яго радыус-вектар адносна пачатку каардынат мяняецца з цягам часу па закону  $\vec{r} = 2t\vec{i} + 8t^2\vec{j}$ ?

1.39. Радыус-вектар часцінкі вызначаецца выразам  $\vec{r} = 3t\vec{i} + 0,5t^2\vec{j}$ . Знайсці модулі скорасці і паскарэння часцінкі ў момант  $t = 5$  с.

1.40. Вызначыць скорасць кулі, калі пры выстрале з пісталета ў гарызантальным напрамку ў другім з двух вертыкальна замацаваных тонкіх лістоў паперы, якія знаходзіліся на адлегласці  $l = 20$  м, прабоіна аказалася на  $h = 5$  см ніжэй, чым у першым.

1.41. Ракета запушчана пад вуглом  $\alpha = 60^\circ$  да гарызонта з пачатковай скорасцю  $v_0 = 90,4$  м/с. Вызначыць час гарэння запалу ракеты, калі вядома, што яна ўспыхнула ў найвышэйшым пункце сваёй траекторыі.

1.42. Пад якім вуглом да гарызонта неабходна накіраваць струмень вады, каб вышыня яго пад'ёму была роўная адлегласці, на якую б'е струмень вады?

1.43. Даказаць, што пры адсутнасці супраціўлення паветра найбольшая далечыня палёту цела, кінутага пад вуглом да гарызонта, будзе пры  $\alpha = 45^\circ$ .

1.44. Пад якім вуглом да гарызонта кінута цела, калі вядома, што найбольшая вышыня пад'ёму складае  $1/4$  частку далёкасці палёту? Супраціўленне паветра не ўлічваць.

1.45. З вежы вышынёй  $19,6$  м у гарызантальным напрамку кінута цела са скорасцю  $10$  м/с. Запісаць ураўненне траекторыі палёту цела. Чаму роўная скорасць цела ў момант падзення? Які вугал утварае гэтая скорасць з гарызантальным напрамкам? Супраціўленне паветра не ўлічваць.

1.46. З аднаго пункта адначасова кінуты два целы з аднолькавай скорасцю пад рознымі вугламі  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  да гарызонта. Вызначыць адлегласць паміж цэламі праз  $t = 2,0$  с пасля пачатку руху, калі  $v_0 = 10$  м/с,  $\alpha_1 = 30^\circ$ ,  $\alpha_2 = 60^\circ$ .

1.47. На якой вышыні вектар скорасці цела, кінутага пад вуглом  $\alpha = 45^\circ$  да гарызонта з пачатковай скорасцю  $v_0 = 20$  м/с, будзе ўтвараць з гарызонтам вугал  $\beta = 30^\circ$ ? Супраціўленне паветра не ўлічваць.

1.48. Праз які час вектар скорасці цела, кінутага пад вуглом  $\alpha = 60^\circ$  да гарызонта з пачатковай скорасцю  $20$  м/с, будзе ўтвараць з гарызонтам

вугал  $\beta = 30^\circ$  ? Супраціўленне паветра не ўлічваць.

1.49. З вяршыні гары кінута цела ў гарызантальным напрамку са скорасцю  $19,6$  м/с. Вызначыць тангенцыяльнае і нармальнае паскарэнні цела праз  $2,0$  с пасля пачатку руху. Які вугал утварае вектар поўнага паскарэння з вектарам скорасці?

1.50. Матэрыяльны пункт рухаецца ў плоскасці  $X Y$ . Гэты рух апісваецца ўраўненнямі  $x = 3\sin\omega t$ ,  $y = 3\cos\omega t$ . Запісаць ураўненне траекторыі пункта. Знайсці залежнасць пройдзенага пунктам шляху ад часу, лічачы, што пры  $t = 0$   $s = 0$ .

1.51. Матэрыяльны пункт рухаецца ў плоскасці  $X Y$ . Вызначыць траекторыю пункта, калі яго рух апісваецца ўраўненнямі  $x = 3\sin\omega t$ ,  $y = 2\cos\omega t$ .

## Вярчальны рух

1.52. Вызначыць сярэдняю скорасць руху самалёта, калі вядома, што ён вылецеў з Хабараўска ў  $6$  гадз. па мясцовым часе, а прыляцеў ў Маскву ў  $6$  гадз. па маскоўскім часе. Лічыць, што Масква і Хабараўск знаходзяцца на шыраце  $50^\circ$ .

1.53. На гарызантальным вале, які робіць  $200$  аб/с, на адлегласці  $20$  см адзін ад аднаго замацаваны два тонкія дыскі. Для вызначэння скорасці палёту кулі стрэлілі такім чынам, што куля прабіла абодва дыскі на аднолькавай адлегласці ад восі вярчэння. Вызначыць скорасць кулі, калі вуглавое зрушэнне прабоін аказалася роўным  $18^\circ$ .

1.54. Пры павароце трактара, які рухаецца са скорасцю  $24$  км/гадз., яго цэнтр мас апісвае дугу радыусам  $R = 9,0$  м. Знайсці рознасць скарасцей гусеніц трактара, калі адлегласць паміж імі  $d = 1,5$  м.

1.55. На калясцы, якая рухаецца па роўнай пляцоўцы ўздоўж восі  $X$  са скорасцю  $v_{0x} = 5,0$  м/с, устаноўлены рухавік, на вал якога насаджаны дыск дыяметрам  $D = 20$  см, які робіць  $n = 13$  аб/с. Напрамак вярчэння дыска такі, што лінейная скорасць любога пункта ў момант праходжання ім крайняга ніжняга становішча супадае з напрамкам восі  $X$ . Як будзе рухацца дыск, калі ён сарвецца з вала? Лічыць, што дыск не слізгае, калі коціцца па пляцоўцы. Трэнне не ўлічваць.

1.56. З якой скорасцю рухалася павозка пры кіназдымцы, калі пры дэманстрацыі кінафільма заднія колы, у якіх па  $N = 12$  спіц, на экране здаюцца нерухомымі? Дыяметр колаў  $D = 1,0$  м. Кіназдымка праводзілася са скорасцю  $v_1 = 24$  кадры ў секунду.

1.57. Колькі абаротаў зрабілі колы аўтамабіля пасля ўключэння тормаза да поўнага яго спынення, калі ў момант пачатку тармажэння аўтамабіль меў скорасць  $v_0 = 60$  км/гадз. і спыніўся за  $t = 3,0$  с пасля пачатку тармажэння? Дыяметр колаў  $D = 0,70$  м. Чаму роўнае сярэдняе вуглавое паскарэнне колаў пры тармажэнні?

1.58. Скорасць электрычкі  $36$  км/гадз. Вызначыць скорасць пункта  $A$  на



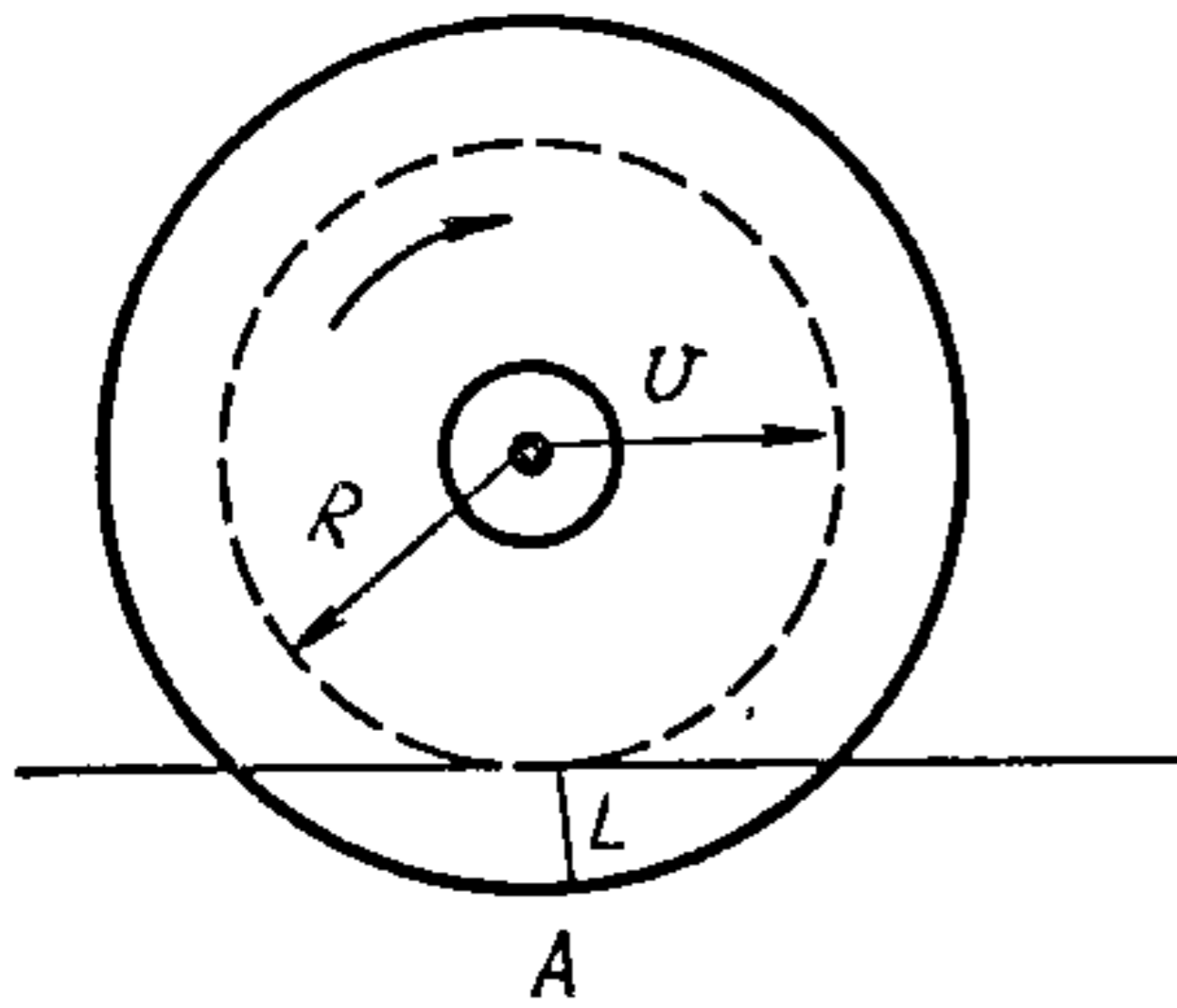


Рис. 1.4

вобадзе кола электрычкі (рыс. 1.4) адносна рэйкі ў момант, калі ён знаходзіцца ў найвышэйшым, найніжэйшым стане і на ўзроўні восі кола. Радус кола 0,50 м. Пункт А ніжэй узроўню рэйкі на 5,0 см. Чаму роўная вуглавая скорасць вярчэння кола?

1.59. Вызначыць вуглавое паскарэнне кола, частата абарачэння якога за час дваццаці поўных абаротаў узрасла раўнамерна ад  $n_0 = 1,0$  аб/с да  $n = 5,0$  аб/с.

1.60. За час руху ў канале ствала куля робіць адзін поўны абарот. Якая сярэдняя вуглавая скорасць вярчэння кулі, калі ў момант вылету скорасць яе  $v = 860$  м/с, а даўжыня ствала  $l = 1,0$  м? Чаму роўнае сярэдняе вуглавое паскарэнне кулі?

1.61. Вызначыць вуглавую скорасць і вуглавое паскарэнне цвёрдага цела, якое верціцца вакол нерухомай восі  $z$  па закону  $\varphi = at - bt^2$ , дзе  $a = 20$  с<sup>-1</sup>,  $b = 1$  с<sup>-2</sup>. Ахарактарызаваць рух гэтага цела. Пабудаваць графік залежнаці вуглавой скорасці і вуглавога паскарэння ад часу.

### Вагальны рух

1.62. Амплітуда гарманічных ваганняў роўная 5,0 см, перыяд — 4,0 с. Вызначыць максімальныя скорасць і паскарэнне пункта, які вагаецца, калі ў пачатковы момант часу ён знаходзіўся ў стане максімальнага зрушэння.

1.63. Пункт гарманічна вагаецца з перыядам 12 с і пачатковай фазай, роўнай 0. За які час ён адхіліцца ад стану раўнавагі на адлегласць, роўную палове амплітуды?

1.64. Запісаць ураўненне вагальнага руху матэрыяльнага пункта, які робіць ваганні з амплітудай 5 см, перыядам 2 с і пачатковай фазай 45°.

1.65. Ваганні матэрыяльнага пункта апісваюцца ўраўненнем  $x = 0,03 \sin[\pi(t + 0,5)]$ . Вызначыць максімальныя скорасць і паскарэнне. Чаму роўная фаза ваганняў праз 5,0 с ад пачатку руху?

1.66. Вызначыць пачатковую фазу гарманічнага ваганця цела, калі праз 0,25 с ад пачатку руху зрушэнне, якое змяняецца па закону сінуса, было роўнае палавіне амплітуды. Перыяд вагання 6,0 с.

1.67. Лічачы рух поршня ў цыліндры аўтамабільнага рухавіка гарманічным ваганнем, вызначыць яго максімальныя скорасць і паскарэнне, калі аўтамабіль рухаецца са скорасцю  $v = 72$  км/гадз. на прамой перадачы, радус колаў  $R = 344$  мм, ход поршня  $l = 100$  мм.

1.68. Запісаць ураўненне вагальнага руху матэрыяльнага пункта, які складаецца з двух аднолькава накіраваных гарманічных ваганняў, што апісваюцца ўраўненнямі:

$$x_1 = 4 \sin 2\pi \left( t + \frac{1}{3} \right); \quad x_2 = 3 \sin \left( 2\pi t + \frac{\pi}{2} \right).$$

1.69. Складаюцца два аднолькава накіраваныя гарманічныя ваганні з частотамі 440 і 440,5 Гц. Якой будзе частата змены амплітуды атрыманага вагання?

1.70. Знайсці ўраўненне траекторыі руху матэрыяльнага пункта, які ўдзельнічае ў двух узаемна перпендыкулярных ваганнях, дадзеных ўраўненнямі:  $x = 2\sin\pi(2t + 1)$ ;  $y = 2\sin(2\pi t + 90^\circ)$ . Паказаць напрамак руху.

1.71. Складзі графічна два ўзаемна перпендыкулярныя ваганні з аднолькавымі амплітудамі і фазамаі, перыяды якіх адпаведна роўныя 1 і 2 с.

## § 2. ДЫНАМІКА МАТЭРЫЯЛЬНАГА ПУНКТА І СІСТЭМЫ МАТЭРЫЯЛЬНЫХ ПУНКТАЎ

Асноўнае ўраўненне дынамікі (другі закон Ньютана):

$$d\vec{p}/dt = \vec{F},$$

дзе  $\vec{p} = m\vec{v}$  — імпульс часцінкі;  $m$  — яе маса;  $\vec{v}$  — скорасць.

Імпульс сістэмы ровен суме імпульсаў яе асобных часцінак:

$$\vec{p} = \sum \vec{p}_i.$$

Паступальны рух сістэмы часцінак як цэлага можна характарызаваць рухам аднаго пункта — цэнтра мас сістэмы:

$$m \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{F},$$

дзе  $m = \sum m_i$  — сумарная маса ўсіх часцінак сістэмы;  $\vec{v}_c$  — скорасць руху цэнтра мас;  $\vec{F} = \sum \vec{F}_i$  — раўнадзейная ўсіх знешніх сіл.

Радыус-вектар, які вызначае месцазнаходжанне цэнтра мас сістэмы часцінак у прасторы адносна адвольнага пункта  $O$ :

$$\vec{r}_c = \frac{\sum m_i \vec{r}_i}{\sum m_i},$$

дзе  $m_i$  — маса;  $i$  — нумар часцінкі;  $\vec{r}_i$  — яе радыус з пачаткам у пункце  $O$ .

Ураўненне руху цела пераменнай масы:

$$m \frac{dv}{dt} = \vec{u} \frac{dm}{dt} + \vec{F},$$

дзе  $\vec{u}$  — скорасць аддзяляемага (далучаемага) рэчыва адносна цела, якое рухаецца.

Скорасць ракеты (формула Цыялкоўскага):

$$v = -u \ln \frac{M_0}{M},$$

дзе  $u$  — скорасць часцінак адносна ракеты;  $M_0$ ,  $M$  — пачатковая і бягучая масы ракеты адпаведна.

Сіла трэння слізгання:

$$F = \mu N,$$

дзе  $\mu$  — каэфіцыент трэння;  $N$  — нармальны ціск.

2.1. Пад дзеяннем некаторай сілы цела масай  $m = 3$  кг рухаецца пра-



малінейна. Гэты рух апісваецца ўраўненнем  $x = 2t^3 - 3t^2 + 5t + 4$ . Чаму роўная сіла, якая дзейнічае на цела ў момант часу  $t = 5$  с? Пабудаваць графік залежнасці сілы ад часу.

2.2. Якая скорасць кулі пры вылеце з духавой стрэльбы, калі яе маса  $m = 2,5$  г, даўжыня ствала  $l = 0,70$  м, калібр  $D = 5,0$  мм, а сярэдні ціск паветра ў час стральбы  $p = 9,8$  МПа?

2.3. Вагон масай  $10^4$  кг адчапіўся ад састава, які рухаўся, і за 20 с роўназапаволенага руху прайшоў шлях 20 м, пасля чаго спыніўся. Знайсці сілу трэння, каэфіцыент трэння і пачатковую скорасць вагона.

2.4. Па слізкай дарозе звычайна ідуць, робячы невялічкія крокі. Якая павінна быць шырыня кроку, каб чалавек ішоў, не баючыся паваліцца, калі даўжыня яго ног роўная 1 м, а каэфіцыент трэння падэшвы абутку аб дарогу 0,1?

2.5. Аўтамабіль рухаецца ўверх па нахільнай дарозе са скорасцю  $v = 10$  м/с. Вызначыць шлях, пройдзены аўтамабілем да прыпынку, і час яго руху, калі каэфіцыент трэння  $\mu = 0,5$ , а вугал нахілу  $\alpha = 10^\circ$ .

2.6. Вызначыць каэфіцыент трэння паміж нахільнай плоскасцю і цэлам, якое рухаецца па ёй, калі вядома, што гэтае цела мае пачатковую скорасць  $v_0 = 5,0$  м/с і за час руху ўверх праходзіць шлях  $s = 2,0$  м. Вугал нахілу плоскасці  $\alpha = 30^\circ$ .

2.7. Цела, якому нададзена пачатковая скорасць, паралельная нахільнай плоскасці, падымаецца па ёй, а потым апускаецца. У якім выпадку (пры пад'ёме ці спуску) і ў колькі разоў час руху цела большы, калі яно вярнулася ў пачатковае становішча? Ці будзе канчатковая скорасць спуску роўнай пачатковай скорасці?

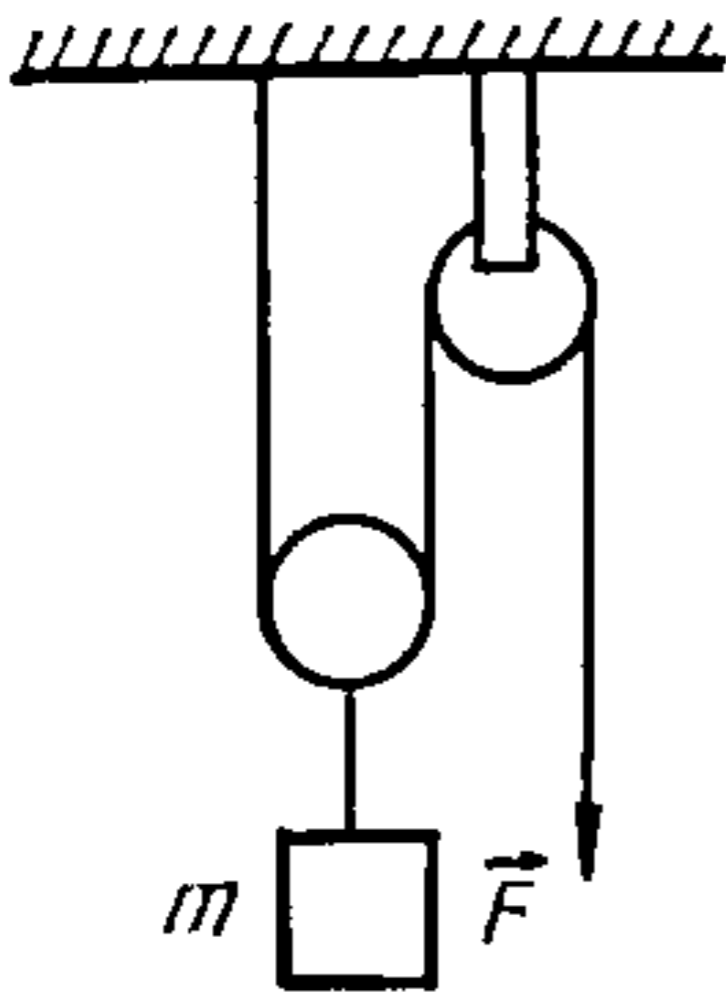
2.8. Чаму роўны каэфіцыент трэння колаў аўтамабіля аб дарогу, калі пры скорасці аўтамабіля  $v = 10$  м/с тармажны шлях  $s = 8,0$  м?

2.9. На калясачцы масай  $m_1 = 20$  кг ляжыць груз масай  $m_2 = 5$  кг. Да груза прыкладзена сіла  $F$ , пад дзеяннем якой калясачка з грузам атрымала паскарэнне  $a$ . Сіла дзейнічае пад вуглом  $30^\circ$  да гарызонта. Якім павінна быць мінімальнае значэнне гэтай сілы, каб груз не слізгаў па калясачцы? Каэфіцыент трэння паміж грузам і каляскай  $\mu = 0,20$ . Трэненне паміж калясачкай і дарогай не ўлічваць. З якім паскарэннем будзе рухацца калясачка пад дзеяннем гэтай сілы?

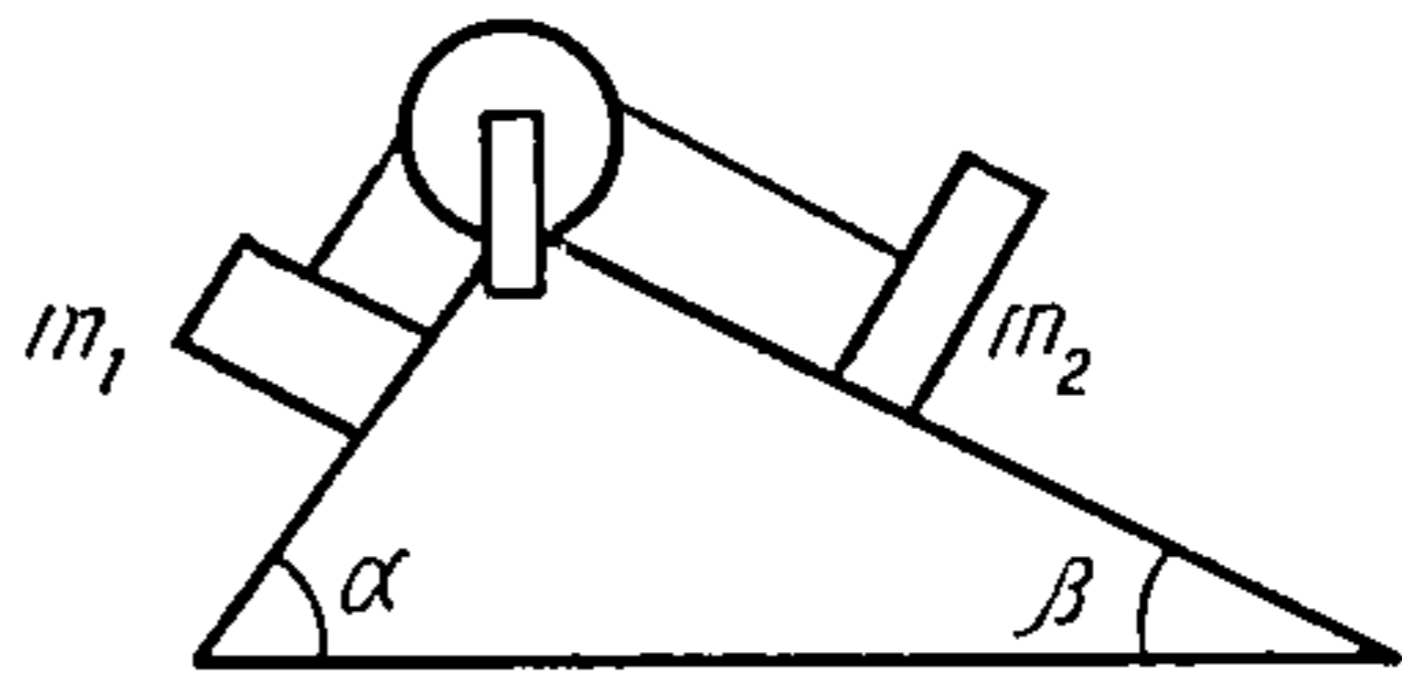
2.10. Цераз нерухома блок перакінута тонкая нерасцяжная нітка, на канцах якой падвешаны два грузы масамі  $m_1 = 200$  г і  $m_2 = 300$  г. Які шлях пройдзе кожны з грузаў за 1 с? Масу блока і трэнне пры яго вярчэнні не ўлічваць.

2.11. Груз масай  $m = 10$  кг падымаецца ўверх з дапамогай сістэмы рухомага і нерухомага блокаў (рыс. 2.1). Вызначыць паскарэнне груза, калі да канца ніткі, перакінутай цераз нерухома блок, прыкладзена сіла  $F = 60$  Н. Масу ніткі і блокаў не ўлічваць.

2.12. Аднародны стрыжань даўжынёй  $L = 5,0$  м падымаецца вертыкальна



Рыс. 2.1



Рыс. 2.2

ўверх пад дзеяннем сілы  $F = 500$  Н, прыкладзенай да аднаго з яго канцоў. З якой сілай стрыжань расцягнуты ў сячэнні, што знаходзіцца на адлегласці  $l = 1,0$  м ад яго ніжняга канца?

2.13. Цела масай  $m$  ляжыць на нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 30^\circ$ . Які шлях пройдзе яно за  $t = 1$  с, калі нахільнай плоскасці надаць паскарэнне  $a = 3,8$  м/с<sup>2</sup>, накіраванае вертыкальна ўверх? Каэфіцыент трэння  $\mu = 0,20$ .

2.14. Два грузы масамі  $m_1 = 4,0$  кг і  $m_2 = 1,0$  кг звязаны ніткай, перакінутай цераз блок, які прымацаваны да прызмы (рыс. 2.2), і могуць слізгаць па гранях гэтай прызмы. Знайсці паскарэнне грузаў, калі  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\beta = 30^\circ$ , а каэфіцыент трэння  $\mu = 0,20$ . Даследаваць магчымыя выпадкі.

2.15. Якое найбольшае паскарэнне можа развіць аўтамабіль пры руху ўверх па нахільнай дарозе з вуглом нахілу  $\alpha = 20^\circ$ , калі каэфіцыент трэння колаў аб пакрыццё дарогі  $\mu = 0,5$ ? Які шлях пройдзе аўтамабіль за  $t = 10$  с, калі ў момант пачатку пад'ёму скорасць яго  $v_0 = 10$  м/с?

2.16. На гарызантальнай паверхні ляжыць цела масай 5,0 кг. Які шлях пройдзе гэта цела за  $t = 1,0$  с, калі да яго прыкладзена сіла  $F = 50$  Н, што ўтварае вугал  $\alpha = 60^\circ$  з гарызонтам? Каэфіцыент трэння паміж целам і паверхняй  $\mu = 0,20$ .

2.17. З якім паскарэннем будзе рухацца цела масай  $m = 2,0$  кг у гарызантальным напрамку, калі да яго прыкладзена сіла  $F = 5,0$  Н, накіраваная пад вуглом  $\alpha = 45^\circ$  да гарызонта? Каэфіцыент трэння  $\mu = 0,10$ .

2.18. Аднародная цяжкая гнуткая нітка даўжынёй  $l$  ляжыць на нахільнай плоскасці прызмы, што ўтварае вугал  $\alpha$  з гарызонтам, і адзін канец ніткі звісае ўздоўж вертыкальнай грані прызмы. Пры якой найменшай даўжыні звісаючай часткі нітка пачне слізгаць, спаўзаючы з прызмы, калі каэфіцыент трэння  $\mu$ ?

2.19. Аднародны ланцуг ляжыць на гарызантальнай паверхні стала і пры гэтым адзін яго канец звісае са стала. Вызначыць каэфіцыент трэння, калі вядома, што ланцуг пачынае саслізгаваць са стала пры даўжыні звісаючага канца, роўнай  $1/6$  частцы ўсёй даўжыні ланцуга.

2.20. Да дынамометра, падвешанага ў кабіне ліфта, прымацаваны груз масай 5,0 кг. Ліфт падымаецца ўверх. Вызначыць паскарэнне ліфта, калі



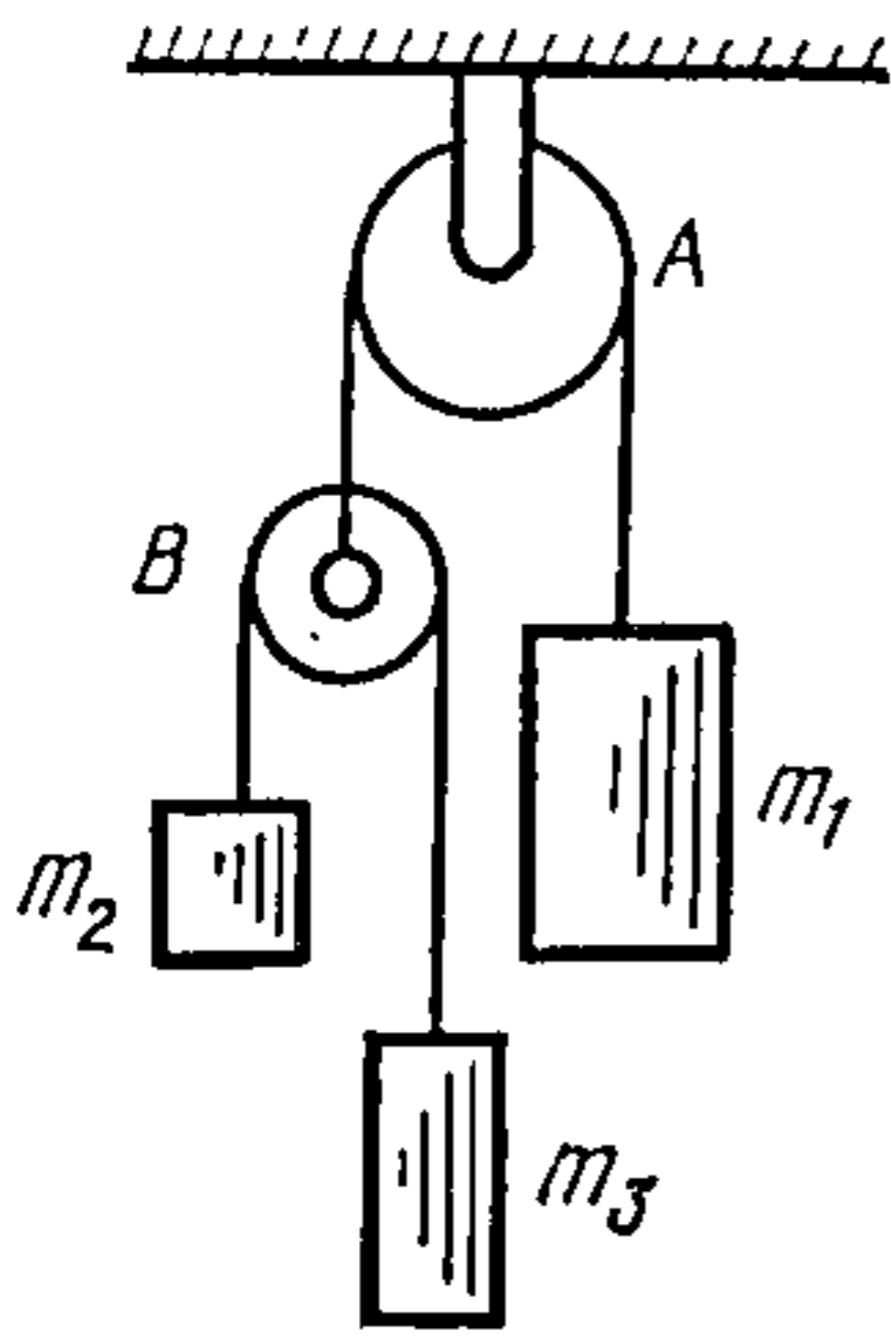


Рис. 2.3

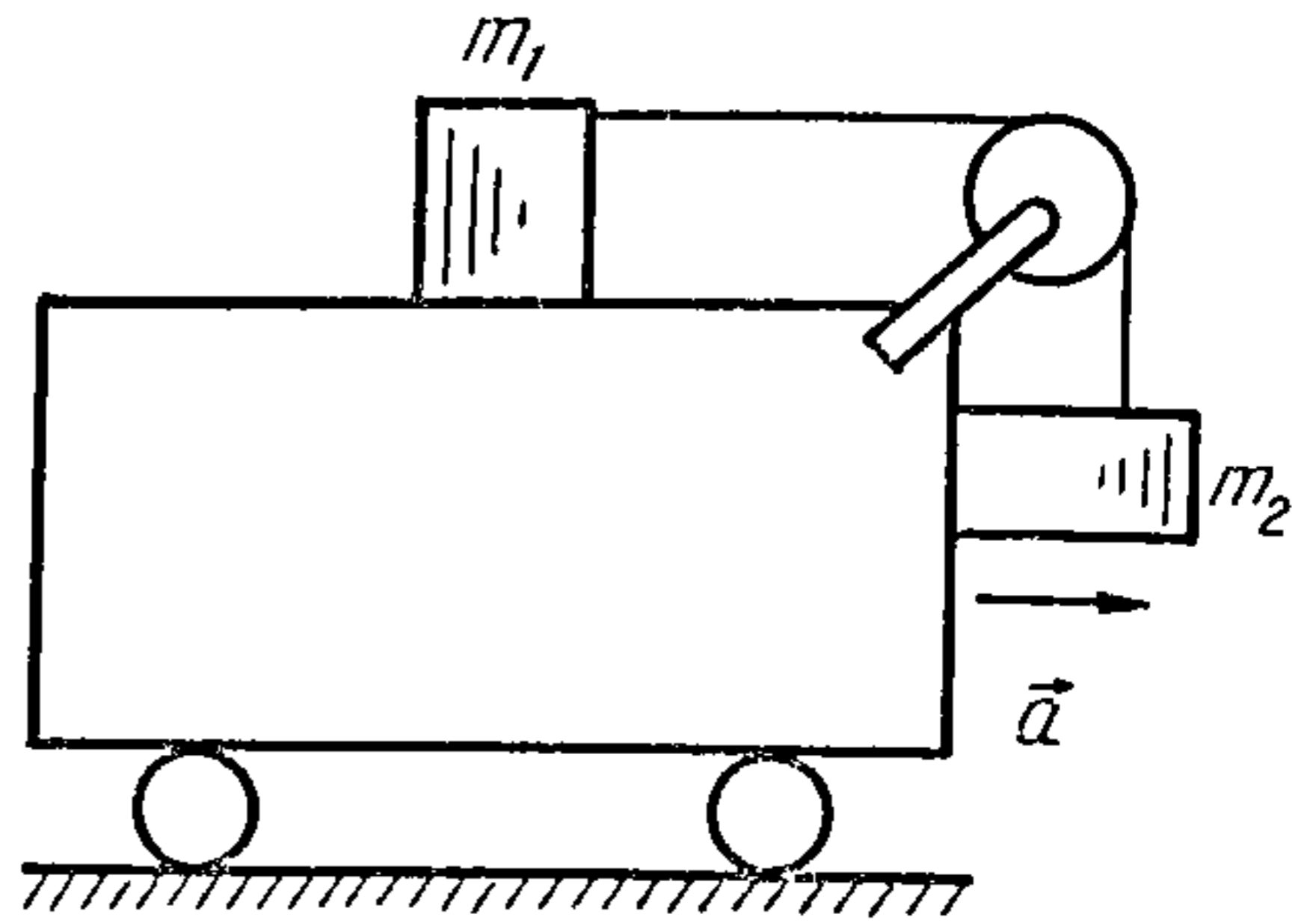


Рис. 2.4

лічыць яго аднолькавым па модулі пры разгоне і тармажэнні. Вядома, што ў час разгону дынамометр паказвае на 15 Н больш, чым пры тармажэнні.

2.21. Да столі кабіны ліфта прымацаваны дынамометр, на якім падвешаны блок. Цераз блок перакінуты нерасцяжны шнур, да канцоў якога прывязаны грузы масамі  $m_1 = 1,0$  кг і  $m_2 = 2,0$  кг. Якія будуць паказанні дынамометра пры руху грузаў, калі ліфт нерухомы і рухаецца ўверх з паскарэннем  $3,0 \text{ м/с}^2$ ? Маса блока і шнура не ўлічваць.

2.22. Цераз нерухомы блок A перакінута нітка, на адным канцы якой падвешаны груз масай  $m_1 = 3,0$  кг, а на другім канцы другі блок B. Цераз блок B таксама перакінута нітка, на канцах якой падвешаны грузы масамі  $m_2 = 1,0$  кг і  $m_3 = 2,0$  кг (рыс. 2.3). З якім паскарэннем будзе рухацца блок B, калі ўсю сістэму не ўтрымліваць? Маса блокаў і нітак не ўлічваць. Даследаваць магчымыя выпадкі.

2.23. На гарызантальнай паверхні каляскі ляжыць груз масай  $m_1 = 2,0$  кг, звязаны з другім грузам масай  $m_2 = 1,0$  кг тонкай нерасцяжнай ніткай, перакінутай цераз нерухомы блок, што замацаваны на калясцы (рыс. 2.4). З якім найбольшым паскарэннем неабходна рухаць каляску ўправа, каб грузы адносна яе знаходзіліся ў спакоі? Каэфіцыент трэння абодвух грузаў аб паверхню каляскі  $\mu = 0,1$ .

2.24. Бак з вадой стаіць на нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 30^\circ$ . З якім накіраваным гарызантальна паскарэннем павінна рухацца нахільная плоскасць, каб паверхня вады ў баку была паралельная ёй?

2.25. На калясцы, што рухаецца ў гарызантальным напрамку з паскарэннем  $a = 9,8 \text{ м/с}^2$ , устаноўлены адвес. Знайсці нацяжэнне ніткі адвеса і вугал, які ўтварае нітка з вертыкаллю, калі маса падвешанага на нітцы груза  $m = 0,10$  кг.

2.26. Цела масай  $m = 1,0$  кг слізгае па бакавой паверхні кліна масай  $M = 2,0$  кг, што ляжыць на гладкай паверхні стала. Бакавыя грані кліна ўтвараюць вугал  $\alpha = 45^\circ$  (рыс. 2.5). З якім паскарэннем будзе рухацца клін на стане, калі трэнне паміж целам і клінам, а таксама паміж клінам і сталом адсутнічае?

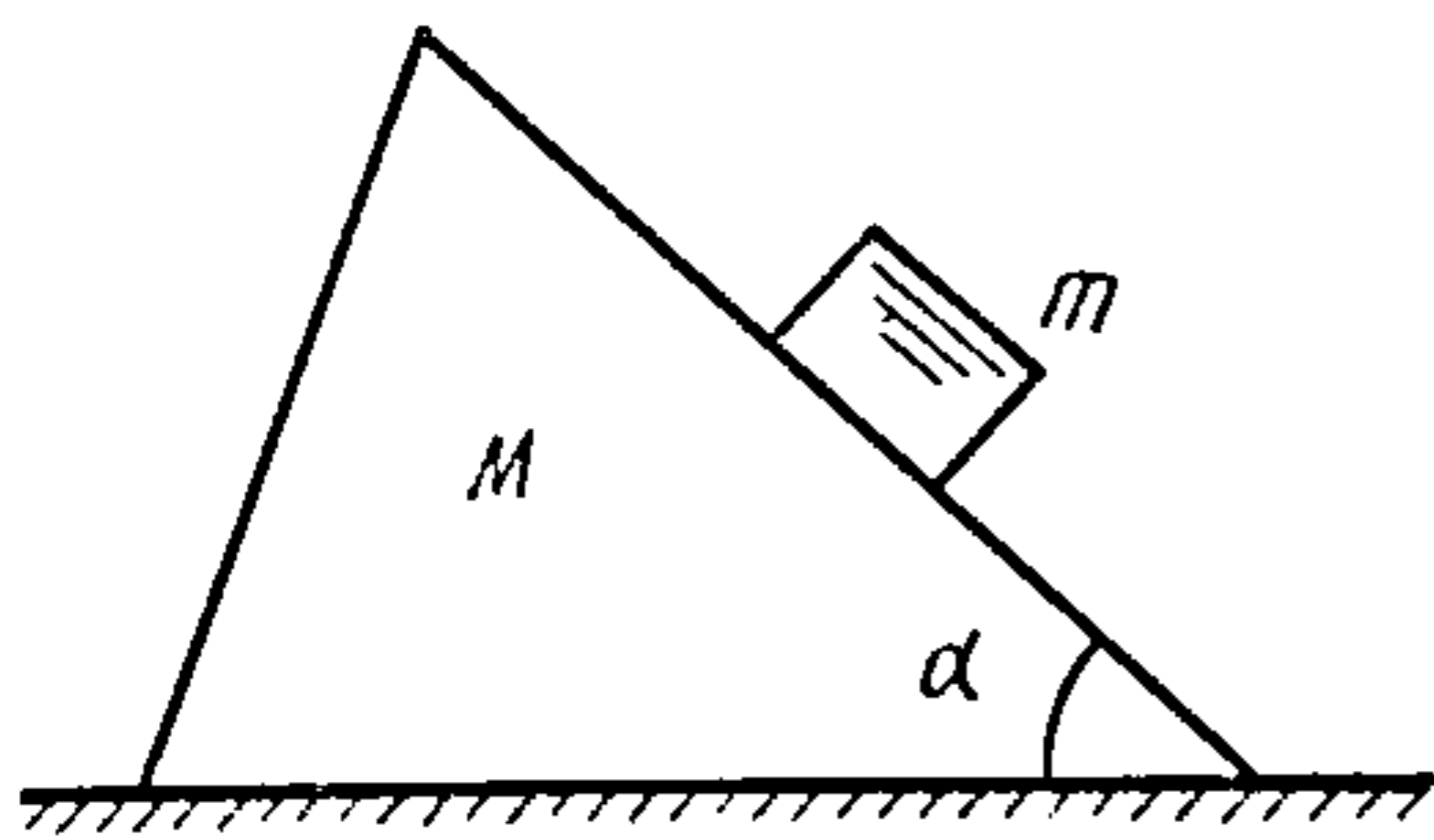


Рис. 2.5

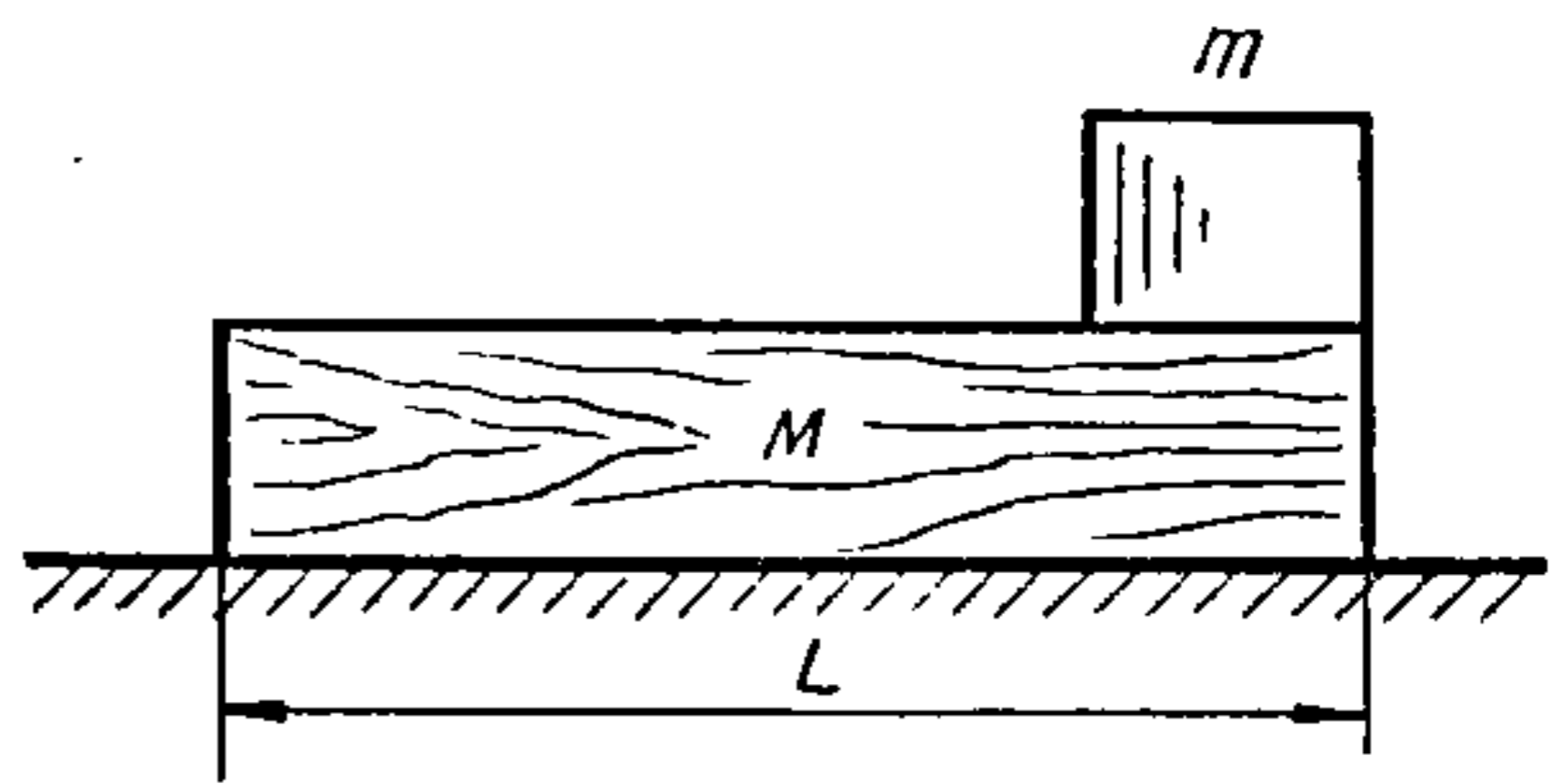


Рис. 2.6

2.27. На канцы дошкі даўжынёй  $l$  і масай  $M$ , што ляжыць на гладкай паверхні стала, знаходзіцца кароткі брусок масай  $m$  (рыс. 2.6). Якую скорасць  $v$  штуршком неабходна надаць дошцы, каб яна выслізнула з-пад бруска? Каэфіцыент трэння слізгання бруска па паверхні дошкі  $\mu$ . Трэне дошкі аб паверхню стала не ўлічваць.

2.28. Цераз нерухома блок перакінута тонкая нерасцяжная нітка, на канцы якой падвешаны грузы масамі  $m_1 = 1,0$  кг і  $m_2 = 2,0$  кг. У пачатковы момант часу абодва грузы знаходзіліся на аднолькавай вышыні. Вызначыць, на якую адлегласць зрушыцца цэнтр мас грузаў праз  $t = 1,0$  с ад пачатку руху. Лічыць, што трэнне адсутнічае, масы блока і ніткі можна не ўлічваць. Знайсці паскарэнне цэнтра мас грузаў.

2.29. На якую адлегласць зрушыцца лодка, што стаіць нерухома на вадзе, калі чалавек масай  $m_1 = 70$  кг пройдзе з носа лодкі на карму? Даўжыня лодкі  $2,5$  м, яе маса  $m_2 = 100$  кг. Супраціўленне вады не ўлічваць.

2.30. Кубікі масамі  $m_1 = 0,1$  кг,  $m_2 = 0,2$  кг і  $m_3 = 0,3$  кг знаходзяцца на гладкай гарызантальнай паверхні стала (рыс. 2.7). Кубік масай  $m_2$  утрымліваецца на вышыні  $h = 30$  см над паверхняй стала. Калі яго вызваліць, то сістэма пачне рухацца. На якую адлегласць зрушыцца кубік масай  $m_3$  да таго часу, калі кубік масай  $m_2$  дакранецца да паверхні стала? Каэфіцыент трэння паміж кубікамі  $\mu$ . Трэне ў блоку адсутнічае, масу блока і ніткі можна не ўлічваць.

2.31. Ракета з вадкім палівам масай  $M = 15 \cdot 10^3$  кг запускаяецца ў вертыкальным напрамку. Расхад паліва  $Q = 150$  кг/с. На якую вышыню падыецца ракета за час работы рухавіка  $t = 1$  мін, калі скорасць выцякання газаў з сопла  $u = 3,0$  км/с?

2.32. Якую масу газаў штосекундна павінна выкідваць ракета пачатковай масай  $M$ , накіраваная вертыкальна ўверх, каб праз некаторы час ад пачатку руху яна магла заставацца нерухомай у полі цяжару? Скорасць газавага струменя адносна ракеты  $u$ . Змены паскарэння сілы цяжару з вышынёй не ўлічваць.

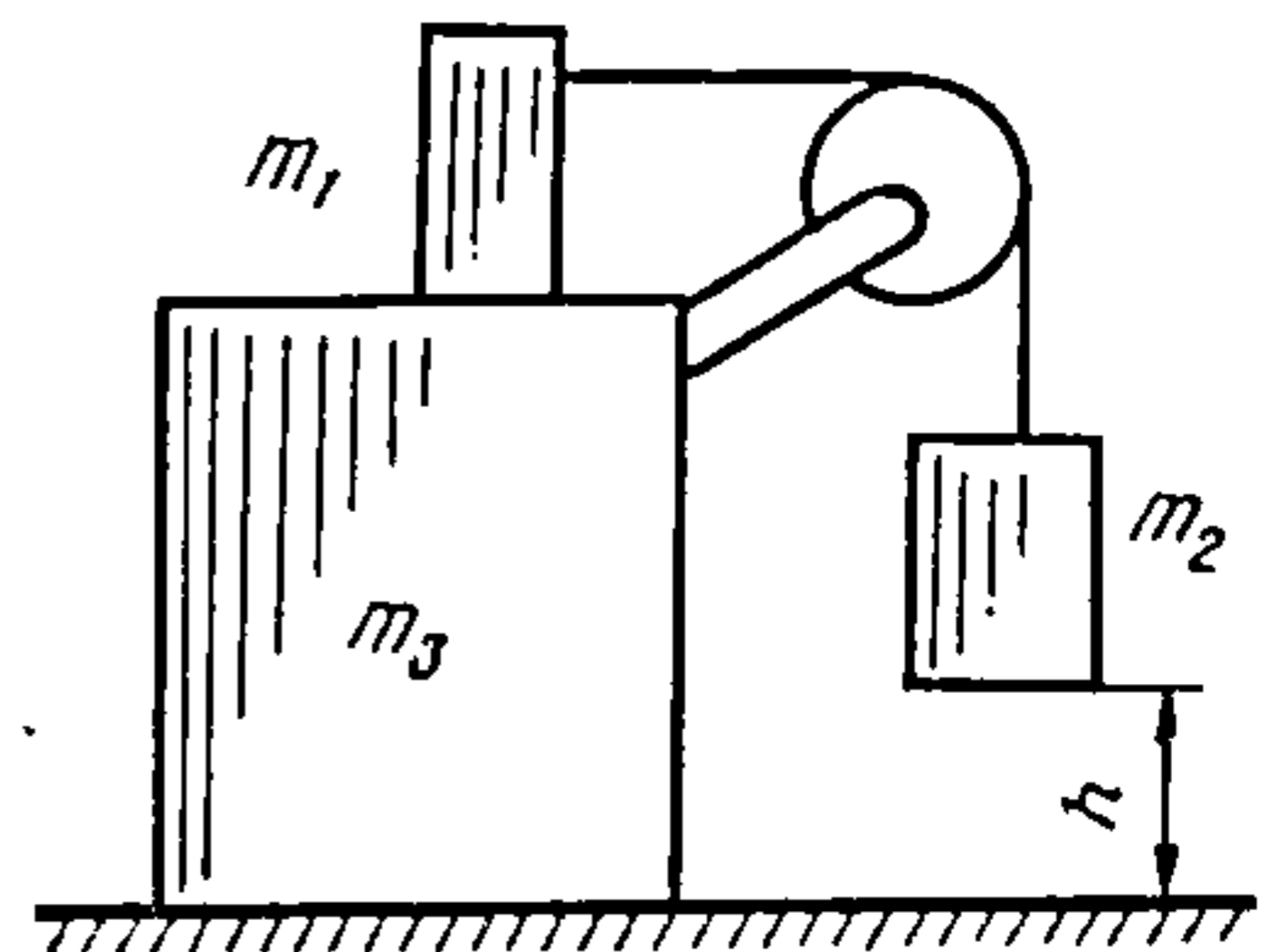


Рис. 2.7



2.33. Платформа нагружена песком, які высыпаецца праз адтуліну ў дне з пастаяннай скорасцю  $Q = 10$  кг/с. Знайсці скорасць платформы праз час  $t = 2$  мін ад пачатку руху, калі пры  $t = 0$  скорасць  $v_0 = 0$  і на яе пачала дзейнічаць пастаянная сіла цягі  $F = 1000$  Н. Маса платформы  $M = 20 \cdot 10^3$  кг. Трэне не ўлічваць.

2.34. Гарызантальна размешчаны дыск верціцца вакол вертыкальнай восі, што праходзіць праз яго цэнтр. На дыску ляжыць груз на адлегласці  $R = 10$  см ад восі вярчэння. Знайсці каэфіцыент трэння спакою паміж дыскам і грузам, калі пры частаце вярчэння дыска  $n = 0,5$  аб/с груз пачынае слізгаць па яго паверхні.

2.35. Вызначыць максімальную скорасць, з якой аўтамабіль можа рухацца па закругленні асфальтаванай шашы радыусам  $R = 100$  м, калі каэфіцыент трэння паміж шынамі аўтамабіля і асфальтам  $\mu = 0,60$ .

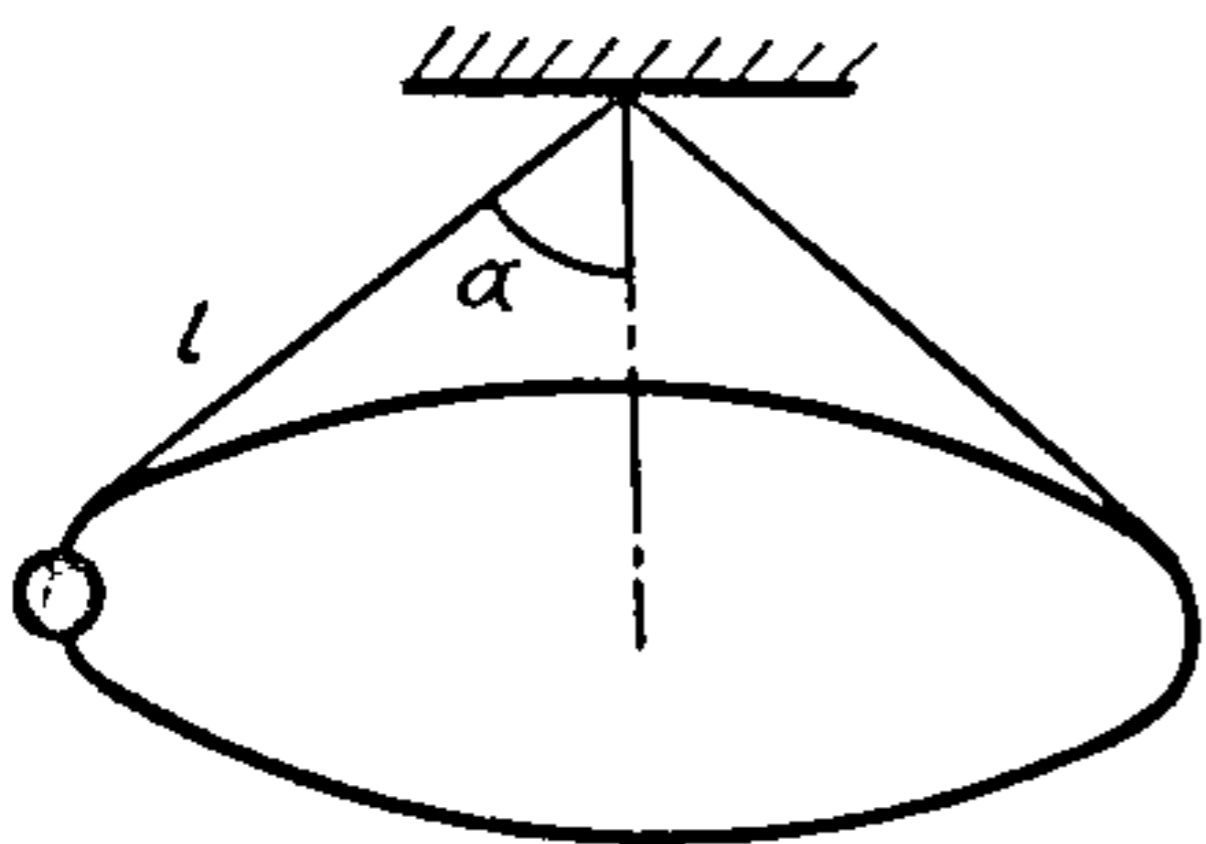
2.36. Пры якой скорасці аўтамабіля ціск яго на ўвагнуты мост у 2 разы большы за ціск на выпуклы мост? Радыус крывізны маста ў абодвух выпадках  $R = 30$  м.

2.37. Вызначыць перыяд абарачэння канічнага маятніка (рыс. 2.8), калі яго даўжыня  $l = 49$  см, а вугал, утвораны ніткай з вертыкаллю,  $\alpha = 60^\circ$ .

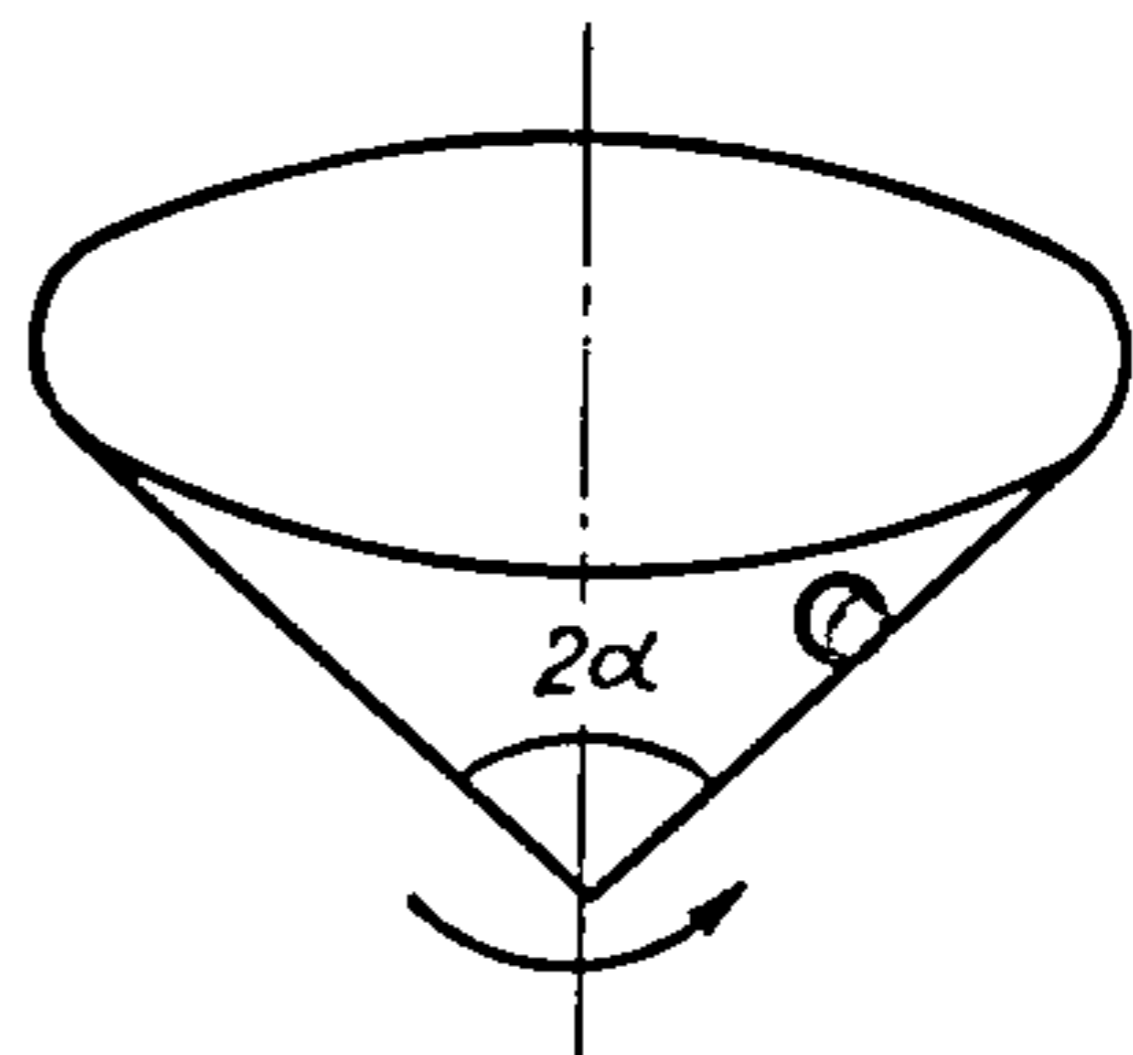
2.38. Цела масай  $m = 200$  г падвешана на нітцы даўжынёй  $l = 80$  см. Яго адхілілі ад стану раўнавагі да вышыні пункта падвесу і адпусцілі, у выніку чаго нітка абарвалася. На якой вышыні знаходзілася цела ў момант разрыву ніткі, калі яна разрываецца пад дзеяннем сілы  $F = 4,0$  Н?

2.39. Сасуд з вадой, падвешаны на вяроўцы даўжынёй  $l = 1$  м, верціцца ў вертыкальнай плоскасці так, што вада з яго не выліваецца. Вызначыць максімальны перыяд абарачэння.

2.40. Унутры вертыкальна размешчанага конуса з вуглом пры вяршыні  $2\alpha = 90^\circ$  размешчана цела (рыс. 2.9). На якой мінімальнай адлегласці ад вяршыні конуса можа знаходзіцца цела, калі каэфіцыент трэння паміж целам і паверхняй конуса  $\mu = 0,20$ , а конус верціцца вакол сваёй восі з вуглавой скорасцю  $\omega = 7,0$  рад/с? Знайсці максімальную адлегласць.



Рыс. 2.8



Рыс. 2.9

### § 3. ЗАКОНЫ ЗАХАВАННЯ ЕНЕРГІЇ, ІМПУЛЬСУ І МОМАНТУ ІМПУЛЬСУ

Елементарная работа сілы  $\vec{F}$  на перамяшчэнні  $d\vec{r}$   
 $dA = \vec{F}d\vec{r}$ .

Магутнасць сілы  $\vec{F}$   
 $N = \vec{F}\vec{v}$ ,

дзе  $\vec{v}$  — скорасць.

Работа сіл поля роўная змяншэнню патэнцыяльнай энергіі часцінкі ў гэтым полі:

$$A = E_{p1} - E_{p2}.$$

Прырашчэнне кінетычнай энергіі часцінкі

$$E_{k2} - E_{k1} = A,$$

дзе  $A$  — работа раўнадзейнай усіх сіл, якія дзейнічаюць на часцінку. Прырашчэнне поўнай механічнай энергіі часцінкі ў патэнцыяльным полі:

$$E_2 - E_1 = A_{ст},$$

дзе  $A_{ст}$  — алгебраічная сума работ ўсіх старонніх сіл.

Закон змянення імпульсу сістэмы

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F},$$

дзе  $\vec{F}$  — раўнадзейная ўсіх знешніх сіл. У замкнутай сістэме поўны імпульс не змяняецца (закон захавання імпульсу):

$$\vec{p} = \sum \vec{p}_i = \sum m_i \vec{v}_i = \text{const}.$$

Момант сілы  $\vec{M}$  адносна некаторага пункта  $O$

$$\vec{M} = [ \vec{r}, \vec{F} ],$$

дзе  $\vec{r}$  — радыус-вектар, праведзены з пункта  $O$  ў пункт прыкладання сілы  $\vec{F}$ .

Момант імпульсу часцінкі  $\vec{L}$  адносна некаторага пункта  $O$

$$\vec{L} = [ \vec{r}, \vec{p} ] = m [ \vec{r}, \vec{v} ],$$

дзе  $\vec{r}$  — радыус-вектар, праведзены з пункта  $O$  у пункт, дзе знаходзіцца часцінка:  $\vec{p} = m\vec{v}$  — імпульс часцінкі.

Закон змянення моманту імпульсу  $\vec{L}$  сістэмы

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M},$$

дзе  $\vec{M}$  — сумарны момант усіх знешніх сіл.

Закон захавання моманту імпульсу

$$\vec{L} = \sum \vec{L}_i = \text{const},$$

г.зн. момант імпульсу замкнутай сістэмы часцінак застаецца пастаянным.

3.1. Знайсці работу, выконваемую пры пад'ёме груза масай  $m = 10$  кг па нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 45^\circ$  на адлегласці  $s = 2$  м, калі час пад'ёму  $t = 2,0$  с, а каэфіцыент трэння  $\mu = 0,10$ .

3.2. Парашутыст масай  $m = 70$  кг выконвае зацяжны скачок і праз  $t = 14$  с мае скорасць  $v = 60$  м/с. Лічачы рух парашутыста роўнапаскораным, знайсці работу па пераадоленні супраціўлення паветра.

3.3. Якую магутнасць павінен развіць трактар пры перамяшчэнні пры-



чэпа масай  $m = 5 \cdot 10^3$  кг уверх па ўхіле са скорасцю  $v = 1,0$  м/с, калі вугал нахілу  $\alpha = 20^\circ$ , а каэфіцыент трэння прычэпа  $\mu = 0,20$ ?

3.4. Цела масай  $m = 1,0$  кг кінулі з высокай вежы пад вуглом  $\alpha = 30^\circ$  да гарызонта з пачатковай скорасцю  $v_0 = 8,0$  м/с. Знайсці магутнасць сілы цяжару ў момант часу  $t = 5,0$  с. Чаму роўная работа гэтай сілы за час  $t = 5,0$  с? Супраціўленне паветра не ўлічваць.

3.5. Якую работу выконвае рухавік электрацягніка на шляху 100 м пры разгоне з паскарэннем  $1,5$  м/с<sup>2</sup> уверх па ўхіле з вуглом нахілу  $10^\circ$ , калі маса электрацягніка  $1,2 \cdot 10^5$  кг, а каэфіцыент трэння 0,05?

3.6. Вызначыць магутнасць рухавіка шахтавай клеці, якая падымае з шахты глыбінёй 200 м груз масай  $1,0 \cdot 10^4$  кг за 60 с, калі ККДз роўны 80 %.

3.7. Цягнік масай  $1,0 \cdot 10^6$  кг падымаецца ўверх па ўхіле з вуглом нахілу  $\alpha = 10^\circ$  са скорасцю 15 м/с і праходзіць шлях 2,0 км. Вызначыць работу і сярэдняю магутнасць цеплавоза пры руху цягніка. Каэфіцыент трэння 0,05.

3.8. Знайсці агульную магутнасць, развіваемую матарамі электрацягніка, які складаецца з  $n = 6$  вагонаў масай  $m = 4,0 \cdot 10^3$  кг, калі ён на працягу  $t = 10$  с ад пачатку руху набыў скорасць  $v = 10$  м/с. Каэфіцыент трэння лічыць роўным 0,20.

3.9. Якую работу неабходна затраціць, каб перавярнуць куб масай 5 кг і рабрам 0,1 м з адной грані на другую?

3.10. Якую работу неабходна выканаць, каб тэлеграфны слуп масай 200 кг, да вяршыні якога прымацавана крыжавіна масай 30,0 кг, перавярнуць з гарызантальнага стану ў вертыкальны? Даўжыня слупа 10,0 м.

3.11. Адзін раз камень кідаюць са скорасцю  $v_1$  па гарызантальнай паверхні лёду, а другі раз са скорасцю  $v_2$  у паветра пад вуглом  $45^\circ$  да гарызонта. У якім выпадку каменю надалі большую пачатковую скорасць і ў колькі разоў, калі ў абодвух выпадках перамяшчэнне яго аднолькавае? Каэфіцыент трэння каменя аб лёд лічыць роўным 0,02. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

3.12. Цела масай 2,0 кг пад дзеяннем сілы 50 Н падымаецца па нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $30^\circ$  на вышыню 1,0 м. Каэфіцыент трэння цела аб нахільную плоскасць 0,20. Вызначыць выкананую работу. На што пойдзе гэтая работа?

3.13. На тонкай нітцы даўжынёй 0,50 м падвешаны спружынны пісталет так, што яго ствол размешчаны гарызантальна. На які вугал адхіліцца нітка пасля выстралу, калі куля масай  $m = 20$  г пры вылеце з ствала мае скорасць  $v = 10$  м/с? Маса пісталета  $M = 200$  г.

3.14. Вызначыць магутнасць Ніягарскага вадапада, калі яго вышыня  $h = 50$  м, а сярэднегадавы расход вады  $Q = 5900$  м<sup>3</sup> /с.

3.15. Якой кінетычнай энергіяй валодае цела масай 2,0 кг, калі яно паднялося па нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $30^\circ$  на вышыню 1,0 м? Каэфіцыент трэння паміж цэлам і нахільнай плоскасцю 0,10.

3.16. Куля масай  $m$  ударылася аб балістычны маятнік масай  $M$  і завязла ў ім. Якая частка кінетычнай энергіі кулі перайшла ў цеплыню?

3.17. Два шары, масы якіх  $m_1 = 0,20$  кг і  $m_2 = 0,80$  кг, падвешаныя на дзвюх паралельных нітках даўжынёй  $2,0$  м, датыкаюцца адзін да аднаго. Меншы шар адхіляецца так, што нітка, на якой ён падвешаны, утварае вугал  $90^\circ$  з вертыкаллю і адпускаецца. Знайсці скорасці шароў пасля сутыкнення, лічачы ўдар абсалютна пругкім. Якая скорасць шароў пасля сутыкнення, калі ўдар абсалютна няпружкі? Якая частка энергіі пойдзе на награванне шароў?

3.18. Якая энергія пайшла на дэфармацыю двух сутыкнуўшыхся шароў масамі  $m_1 = m_2 = 4,0$  кг, калі яны рухаліся насустрач адзін аднаму са скорасцямі  $v_1 = 3,0$  м/с і  $v_2 = 8,0$  м/с, а ўдар быў прамы няпружкі?

3.19. Два шары падвешаны на дзвюх паралельных тонкіх нітках і датыкаюцца адзін да аднаго. Меншы шар адхіляецца так, што нітка, на якой ён падвешаны, утварае вугал  $90^\circ$  з вертыкаллю і адпускаецца. Пасля ўдара шары падымаюцца на аднолькавую вышыню. Вызначыць масу меншага шара, калі маса большага  $0,6$  кг, а ўдар абсалютна пругкі.

3.20. Шарык масай  $m$  рухаўся гарызантальна і ўдарыўся аб паверхню прызмы масай  $M$  так, што падскочыў вертыкальна ўверх на вышыню  $h$ . Лічачы ўдар абсалюта пругкім, вызначыць скорасць, якую атрымала прызма пасля ўдара. Трэнне прызмы не ўлічваць.

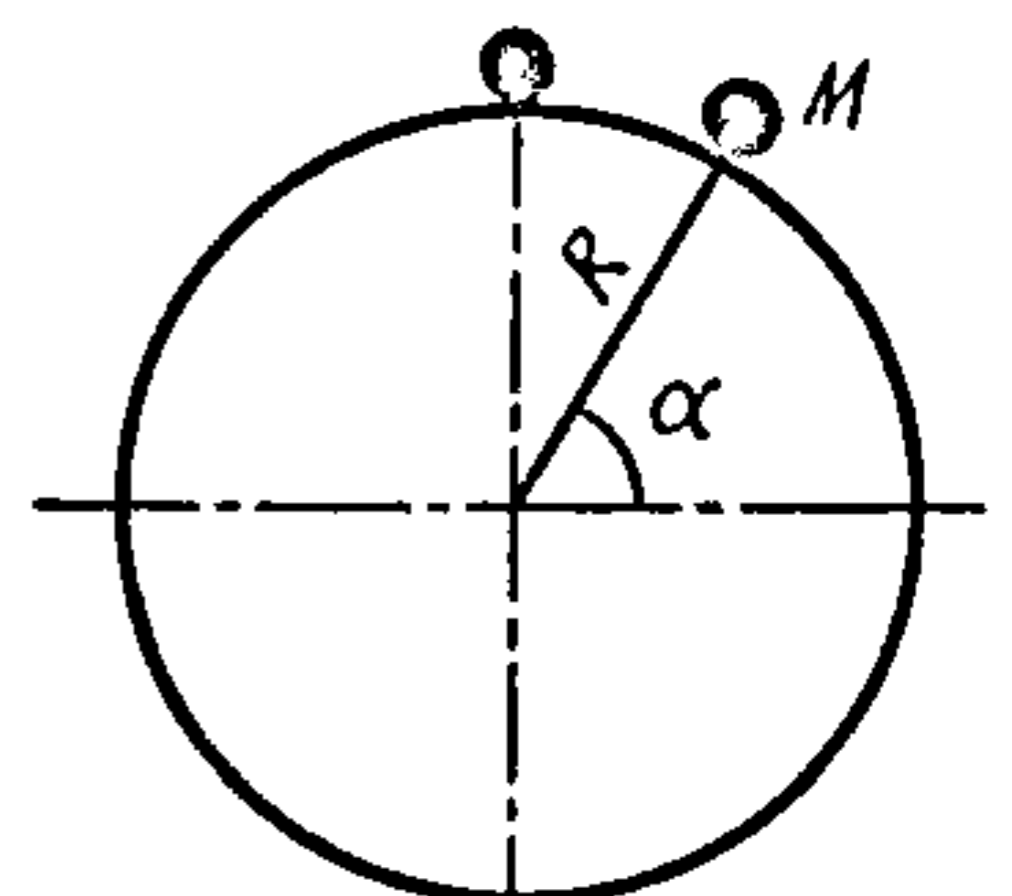
3.21. Малаток масай  $0,80$  кг у момант удару аб шапку цвіка меў скорасць  $1,5$  м/с і забіў яго ў бервяно на глыбіню  $5,0$  мм. Знайсці масу груза, які неабходна пакласці на шапку цвіка, каб ён увайшоў у бервяно на такую ж глыбіню.

3.22. Знайсці імгненную магутнасць, якую развівае сіла цяжару ў канцы першай секунды падзення цела масай  $m = 1,0$  кг. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

3.23. Маленькі шарык ляжыць на паверхні вялікага шара радыусам  $1,0$  м (рыс. 3.1). Якую пачатковую скорасць неабходна надаць маленькаму шарыку, каб ён адарваўся ад паверхні вялікага шара ў пункце  $M$ , размешчаным так, што вугал  $\alpha = 60^\circ$ ? Разгледзець два выпадкі: 1) не звяртаць увагі на трэнне; 2) каэфіцыент трэння малога шарыка аб паверхню вялікага  $\mu = 0,30$ .

3.24. Шарык для гульні ў настольны тэніс радыусам  $r = 15$  мм і масай  $m = 5,0$  г апушчаны ў ваду на глыбіню  $h = 30$  см. Калі шарык адпусцілі, ён выскачыў з вады на вышыню  $h_1 = 10$  см. Якая колькасць цеплыні вылучылася за час трэння шарыка аб ваду?

3.25. Груз масай  $m = 5,0$  кг падымаецца па нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 30^\circ$  пад дзеяннем сілы  $F = 40$  Н, што ўтварае вугал  $\beta = 30^\circ$  з напрамкам перамяшчэння. На якую адлегласць зру-



Рыс. 3.1



шыцца груз уздоўж нахільнай плоскасці да таго моманту часу, калі яго скорасць будзе  $v = 1,0$  м/с? Пачатковая скорасць грузу  $v_0 = 0$ . Каэфіцыент трэння  $\mu = 0,10$ .

3.26. Мяч кінулі вертыкальна ўверх. Што больш: час пад'ёму ці час падзення?

3.27. З вышкі кідаюць вялікі надзьмуты шар так, што адзін раз яго пачатковая скорасць накіравана вертыкальна ўверх, а другі раз такая ж скорасць накіравана вертыкальна ўніз. У якім выпадку ў момант удару шара аб зямлю яго вертыкальная скорасць будзе большай?

3.28. Груз масай  $m$  падымаецца на вышыню  $h$ . Ці залежыць пры гэтым работа, якую выконвае пад'ёмны механізм, ад скорасці пад'ёму? Чаму?

3.29. Брусок масай  $m$  і даўжынёй  $l$  ляжыць на гарызантальнай паверхні стала. Якую работу неабходна выканаць, каб павярнуць брусок вакол цэнтра мас у гарызантальнай плоскасці на малы вугал  $\alpha$ , калі каэфіцыент трэння бруска аб стол  $\mu$ ?

3.30. Пры выбуху гранаты, якая ляцела са скорасцю  $8,0$  м/с, утварыліся два асколкі. Асколак, маса якога складала  $0,3$  масы гранаты, працягваў рухацца ў ранейшым напрамку са скорасцю  $30$  м/с. Вызначыць скорасць другога асколка.

3.31. Мяч масай  $150$  г, які рухаўся са скорасцю  $6$  м/с, ударыўся аб сценку так, што вугал паміж вектарамі скарасцей да ўдару і пасля ўдару роўны  $60^\circ$ . Лічачы ўдар пругкім, вызначыць яго працягласць, калі вядома, што сярэдняя сіла ўдару  $20$  Н.

3.32. З брандспойта сячэннем  $s = 5,0$  см<sup>2</sup> гарызантальны струмень вады б'е са скорасцю  $v = 10$  м/с у вертыкальную сценку ваганеткі, што стаіць на рэйках, і свабодна сцякае па ёй уніз. З якім паскарэннем будзе рухацца ваганетка, калі яе маса  $m = 200$  кг, а напрамак струменя вады паралельны рэйкам? Сілу супраціўлення руху ваганеткі лічыць роўнай  $r = 0,01$  яе сілы цяжару.

3.33. Знайсці пачатковую скорасць слізгаючай па лёдзе хакейнай шайбы, калі яна да ўдару аб борт прайшла шлях  $s = 5,0$  м, а пасля ўдару, які можна лічыць абсалютна пругкім, прайшла яшчэ некаторы шлях і праз  $t = 2,0$  с спынілася. Каэфіцыент трэння шайбы аб лёд  $0,10$ .

3.34. На падножку ваганеткі, якая рухалася прамалінейна са скорасцю  $2,0$  м/с, скокнуў чалавек масай  $m_2 = 60$  кг у напрамку, перпендыкулярным ходу ваганеткі. Маса ваганеткі  $m_1 = 240$  кг. Вызначыць скорасць ваганеткі разам з чалавекам.

3.35. З гарматы масай  $1,1 \cdot 10^3$  кг зроблены выстрал у гарызантальным напрамку. Маса снарада  $54$  кг. Скорасць снарада адносна зямлі  $v = 900$  м/с. Вызначыць скорасць свабоднага адкату гарматы ў момант вылету снарада.

3.36. На платформе замацавана безадкатная гармата, з якой зроблены выстрал уздоўж чыгункі пад вуглом  $45^\circ$  да гарызонта. Вызначыць пачатковую скорасць снарада, калі вядома, што пасля выбуху платформа ад-



кацілася на адлегласць 3,0 м. Маса платформы з гарматай  $M = 2,0 \cdot 10^4$  кг, маса снарада  $m = 10$  кг, каэфіцыент трэння качэння паміж коламі платформы і рэйкамі  $\mu = 0,002$ .

3.37. Граната кінута пад вуглом  $45^\circ$  да гарызонта са скорасцю  $v_0 = 20$  м/с. Праз 2,0 с пасля моманту кідання граната разрываецца на два асколкі, масы якіх суадносяцца як 1:2. Меншы асколак у выніку выбуху атрымаў дадатковую скорасць  $v_1 = 50$  м/с, накіраваную гарызантальна ўздоўж напрамку кідання гранаты. Вызначыць далёкасць палёту большага асколка, калі вядома, што меншы асколак упаў на адлегласці  $s_1 = 83$  м. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

3.38. Тры лодкі, кожная масай  $M = 250$  кг, плывуць адна за адной са скорасцю  $v = 5,0$  м/с. З другой лодкі адначасова ў першую і ў трэцюю кідаюць грузы масай па  $m = 20$  кг са скорасцю  $u = 2,0$  м/с адносна сярэдняй лодкі. Вызначыць скорасці лодак пасля таго, як былі перакінуты грузы.

3.39. Дзве лодкі масай  $M = 100$  кг кожная ідуць паралельным курсам на сустрэчу адна адной з аднолькавай скорасцю 5,0 м/с. Калі лодкі сустракаюцца, з першай у другую перакідаюць груз масай  $m = 25$  кг, а пасля з другой лодкі ў першую перакідаюць такі ж груз. У другі раз грузы перакідаюцца з лодкі ў лодку адначасова. Вызначыць скорасці лодак у абодвух выпадках.

3.40. Кувалда масай 20 кг узнята на вышыню  $h = 1,2$  м і свабодна падае на кавадла. Якая сярэдняя сіла ўдару кувалды аб кавадла, калі ўдар няпружкі, а працягласць яго 0,005 с?

3.41. Да матэрыяльнага пункта, становішча якога вызначаецца радыусам-вектарам  $\vec{r} = 3\vec{i} + 2\vec{j} + 4\vec{k}$ , прыкладзена сіла  $\vec{F} = 5\vec{i} + 4\vec{j} + 3\vec{k}$ . Вызначыць момант сілы  $\vec{M}$  адносна пачатку каардынат, модуль вектара  $M$  і момант сілы  $M_z$  адносна восі  $z$ .

3.42. Цела масай  $m = 100$  г кінута пад вуглом  $\alpha = 45^\circ$  да гарызонта з пачатковай скорасцю  $v_0 = 20$  м/с. Знайсці модуль моманту імпульсу цела адносна пункта кідання ў момант знаходжання яго ў найвышэйшым пункце траекторыі. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

3.43. Даказаць, што пры руху цела пад дзеяннем цэнтральнай сілы момант імпульсу цела адносна пункта, які з'яўляецца полюсам поля, — велічыня пастаянная.

3.44. Паказаць, што планеты, якія рухаюцца пад дзеяннем цэнтральных сіл, маюць плоскую траекторыю. Сілу супраціўлення руху не ўлічваць.

3.45. На гладкай гарызантальнай плоскасці ляжыць аднародны стрыжань даўжынёй  $l = 0,50$  м і масай  $m = 1,0$  кг. Па плоскасці слізгае шарык масай  $m_1 = 0,30$  кг са скорасцю  $v = 10$  м/с, накіраванай перпендыкулярна стрыжню. Шарык удараецца аб стрыжань і спыняецца. Пункт удару знаходзіцца на адлегласці  $l_1 = 20$  см ад сярэдзіны стрыжня. Дыяметр шарыка роўны дыяметру стрыжня. Вызначыць паступальную скорасць стрыжня пасля ўдару і вуглавую скорасць адносна яго цэнтра мас.

3.46. Даказаць, што чалавек, які стаіць на ідэальна гладкай гарызантальнай плоскасці, можа павярнуцца вакол вертыкальнай восі, калі пачне круціць рукой над галавой.

3.47. Паказаць, што другі закон Кеплера (радыус-вектар, праведзены ад Сонца да планеты, за роўныя прамежкі часу апісвае роўныя плошчы) ёсць вынік закону захавання моманту імпульсу.

3.48. Цела масай  $m$  кінута пад вуглом  $\alpha$  да гарызонта са скорасцю  $v$ . Знайсці залежнасць ад часу модуля моманту імпульсу цела адносна пункта кідання. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

3.49. З пункта з каардынатамі  $(0,3,0)$  вертыкальна ўверх кінулі цела масай  $m = 0,5$  кг са скорасцю  $v = 5$  м/с. Знайсці прырашчэнне моманту імпульсу цела адносна пачатку каардынат за час яго палёту ўверх і назад у зыходны пункт. Супраціўленне паветра не ўлічваць. Вось накіравана ўверх.

#### §4. МЕХАНІКА ЦВЁРДАГА ЦЕЛА

Ураўненне дынамікі цвёрдага цела, якое верціцца вакол нерухомай восі  $Z$ ,

$$J \varepsilon_Z = M_Z,$$

дзе  $M_Z$  — алгебраічная сума момантаў знешніх сіл адносна восі  $Z$ .

Момант інерцыі некаторых цел:

1) пункта масай  $m$  на адлегласці  $R$  ад восі вярчэння:

$$J = mR^2;$$

2) аднароднага стрыжня даўжынёй  $l$  адносна восі, што праходзіць праз яго цэнтр мас перпендыкулярна стрыжню:

$$J = \frac{1}{12} ml^2,$$

дзе  $m$  — маса стрыжня. Калі вось вярчэння перпендыкулярная стрыжню і праходзіць праз яго канец, то

$$J = \frac{1}{2} ml^2;$$

3) аднароднага дыска або цыліндра радыусам  $R$  і масай  $m$  адносна восі, супадаючай з восьцю дыска або цыліндра:

$$J = \frac{1}{2} mR^2;$$

4) танкасценнай трубы або кольца адносна восі, супадаючай з восьцю трубы або кольца:

$$J = mR^2;$$

5) пустога цыліндра масай  $m$  адносна восі сіметрыі:

$$J = \frac{1}{2} m (R_2^2 - R_1^2),$$

дзе  $R_1$  і  $R_2$  — унутраны і знешні радыусы адпаведна;

6) аднароднага шара масай  $m$  і радыусам  $R$  адносна восі, супадаючай з яго дыяметрам:

$$J = \frac{2}{5} mR^2;$$

7) тонкага дыска радыусам  $R$  і масай  $m$  адносна восі, супадаючай з дыяметрам:

$$J = \frac{1}{4} mR^2.$$

Момант інерцыі цела  $J$  адносна адвольнай восі вызначаецца па тэарэме Штэрна

$$J = J_0 + ma^2,$$

дзе  $J_0$  — момант інерцыі цела адносна восі, якая паралельная дадзенай і праходзіць праз цэнтр мас;  $a$  — адлегласць паміж восямі.

Работа знешніх сіл пры павароце цвёрдага цела вакол нерухомай восі

$$A = \int_0^\varphi M_Z d\varphi.$$

Кінетычная энергія цела, якое верціцца вакол нерухомай восі:

$$E_k = J\omega^2 / 2.$$

Кінетычная энергія цвёрдага цела пры плоскім руху

$$E_k = \frac{mv_c^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2},$$

дзе  $m$  — маса цела,  $v_c$  — скорасць цэнтра мас;  $J$  — момант інерцыі адносна восі, што праходзіць праз цэнтр мас;  $\omega$  — вуглавая скорасць вярчэння вакол той жа восі.

Момант імпульсу цвёрдага цела адносна нерухомай восі  $Z$

$$L_Z = J_Z\omega_Z,$$

дзе  $J_Z$  — момант інерцыі цела адносна восі  $Z$ ,  $\omega_Z$  — вуглавая скорасць.

## Умовы раўнавагі цвёрдага цела

1. Раўнадзейная ўсіх знешніх сіл, прыкладзеных да цела, павінна быць роўнай нулю:

$$\vec{F} = \sum \vec{F}_i = 0.$$

2. Сумарны момант знешніх сіл адносна адвольнага пункта павінен быць роўны нулю:

$$\vec{M} = \sum \vec{M}_i = 0.$$

## Дынаміка вярчальнага руху цвёрдага цела

4.1. Вызначыць момант інерцыі шара адносна восі, супадаючай з датычнай да яго паверхні. Радыус шара 0,1 м, маса 5 кг.

4.2. Чаму роўны момант інерцыі прамога тонкага стрыжня даўжынёй 0,5 м і масай 0,2 кг адносна восі, якая перпендыкулярная яго даўжынні і праходзіць праз пункт стрыжня, што аддалены на 0,15 м ад аднаго з яго канцоў?

4.3. Вызначыць момант інерцыі Зямлі адносна восі вярчэння, калі лічыць яе шарам радыусам 6,4 Мм і масай  $6 \cdot 10^{24}$  кг.

4.4. На барабан радыусам  $R = 10$  см намотана нітка, да канца якой



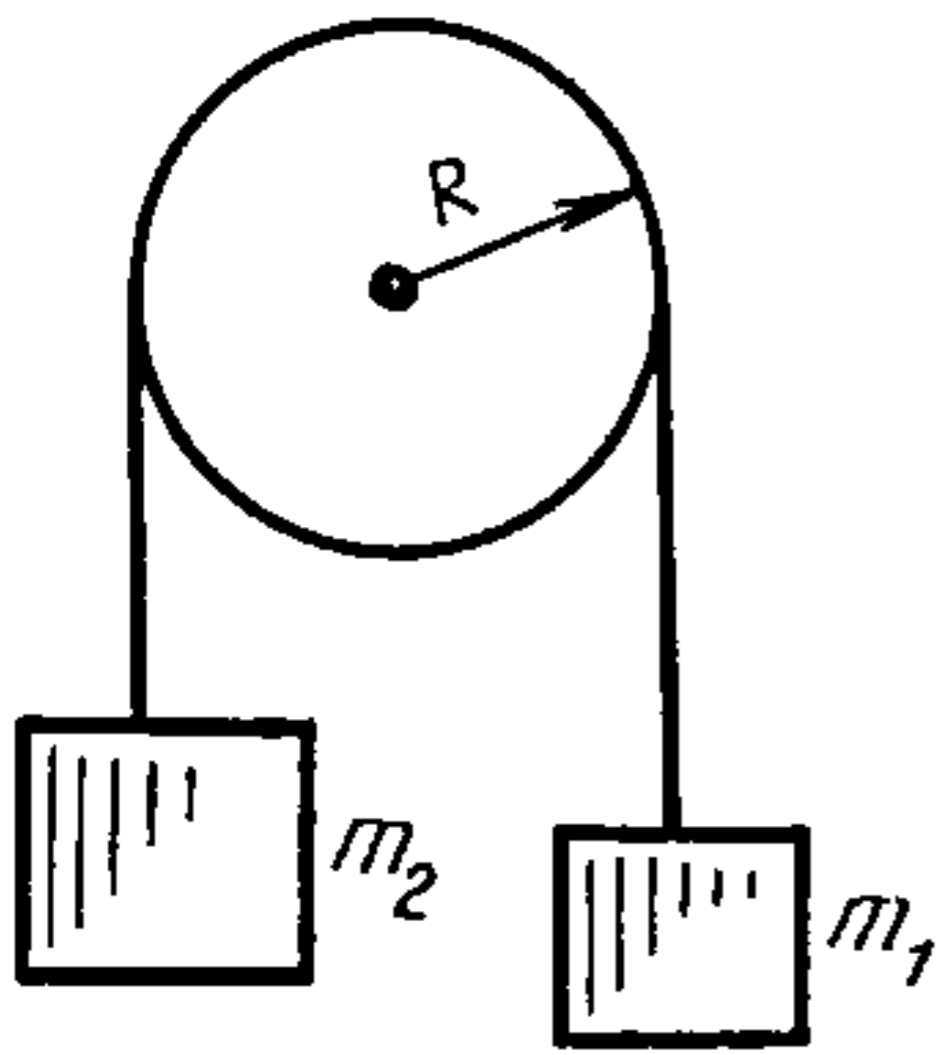


Рис. 4.1

прывязаны груз масай  $m = 0,50$  кг. Знайсці момант інерцыі барабана, калі груз апускаецца з паскарэннем  $a = 1,0$  м/с<sup>2</sup>.

4.5. Махавік (дыск) масай  $m = 10$  кг і радыусам  $R = 10$  см свабодна верціцца вакол восі, якая праходзіць праз цэнтр, з кругавой частатой  $6$  рад/с<sup>-1</sup>. Пры тармажэнні махавік спыняецца праз  $t = 5$  с. Вызначыць момант тармажэння.

4.6. Цераз блок масай  $m = 100$  г перакінута тонкая гнуткая нерасцяжная нітка, на канцах якой падвешаны два грузы масамі  $m_1 = 200$  г і  $m_2 = 300$  г (рыс. 4.1).

Грузы ўтрымліваюцца ў нерухомым стане. З якім паскарэннем будуць рухацца грузы, калі іх не ўтрымліваць? Чаму роўнае вуглавое паскарэнне блока, калі яго радыус  $10$  см? Тэрэнне не ўлічваць.

4.7. З калодзежа з дапамогай калаўрота падымалася вядро з вадой масай  $m = 10$  кг. У той момант, калі вядро знаходзілася на вышыні  $h = 5,0$  м ад паверхні вады, ручка вызвалілася і вядро пачало падаць уніз. Вызначыць лінейную скорасць ручкі ў момант удару вядра аб паверхню вады ў калодзежы, калі радыус ручкі  $R = 30$  см, радыус вала калаўрота  $r = 10$  см, яго маса  $m = 20$  кг. Тэрэнне і масу троса, на якім падвешана вядро, не ўлічваць.

4.8. Махавік масай  $m_1 = 1,0$  кг, што замацаваны на шкiве радыусам  $r = 5,0$  см і масай  $m_2 = 200$  г, прыводзіцца ў вярчальны рух з дапамогай гіры масай  $m_3 = 500$  г, якая прывязана да канца намотанай на шкiў вярчэўкі і апускаецца. Праз які час скорасць махавіка дасягне  $n = 5$  аб/с? Лічыць, што ўся маса махавіка размеркавана на яго вобадзе на адлегласці  $R = 40$  см ад восі вярчэння.

4.9. Да канца тонкай нерасцяжнай ніткі, намотанай на цыліндрычны суцэльны нерухомы блок масай  $m_1 = 200$  г, прымацавана цела масай  $m_2 = 500$  г, якое знаходзіцца на нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 45^\circ$  (рыс. 4.2). Нітка, што ўтрымлівае цела, паралельная гэтай плоскасці. Які шлях пройдзе цела па нахільнай плоскасці за  $t = 1,0$  с, калі каэфіцыент тэрэння слізгання па ёй  $\mu = 0,10$ ? Тэрэнне ў блоку не ўлічваць.

4.10. Які шлях пройдзе дыск, што коціцца без слізгання, падымаючыся ўверх па нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $30^\circ$ , калі яму нададзена пачатковая скорасць  $7,0$  м/с, паралельная нахільнай плоскасці?

4.11. Шар коціцца па нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $30^\circ$ . Якую скорасць будзе мець цэнтр шара адносна гэтай плоскасці праз  $1,5$  с, калі яго пачатковая скорасць была роўная нулю?

4.12. Якую магутнасць павінен развіваць матор, што прыводзіць у рух стабілізуючы гіраскоп, які мае форму дыска радыусам  $R = 1,0$  м і масай  $m = 1000$  кг, калі на

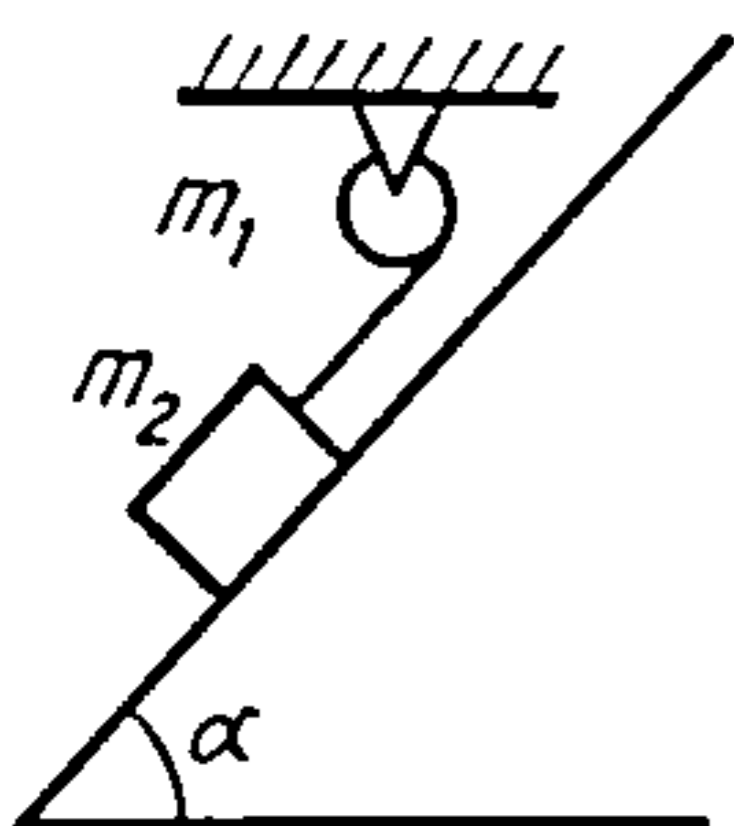


Рис. 4.2

працягу  $t = 1$  мін вуглавая скорасць даводзіцца да  $\omega = 31$  рад/с? Тэрне і супраціўленне паветра не ўлічваць.

4.13. Вылічыць кінетычную энергію дыска масай 2 кг, які коціцца без слізгання па гарызантальнай паверхні з адноснай скорасцю 2 м/с.

4.14. Якую работу патрэбна выканаць, каб махавіку ў форме дыска масай 100 кг і радыусам 0,4 м надаць частату вярчэння  $n = 10$  аб/с, калі ён знаходзіўся ў стане спакою?

4.15. Вызначыць момант сілы тармажэння, якім можна спыніць за  $t = 20$  с махавое кола масай  $m = 50$  кг і радыусам  $R = 0,30$  м, што верціцца з частатой  $n = 20$  аб/с. Масу махавіка лічыць размеркаванай па вобадзе. Чаму роўная работа, выконваемая тармазячым момантам?

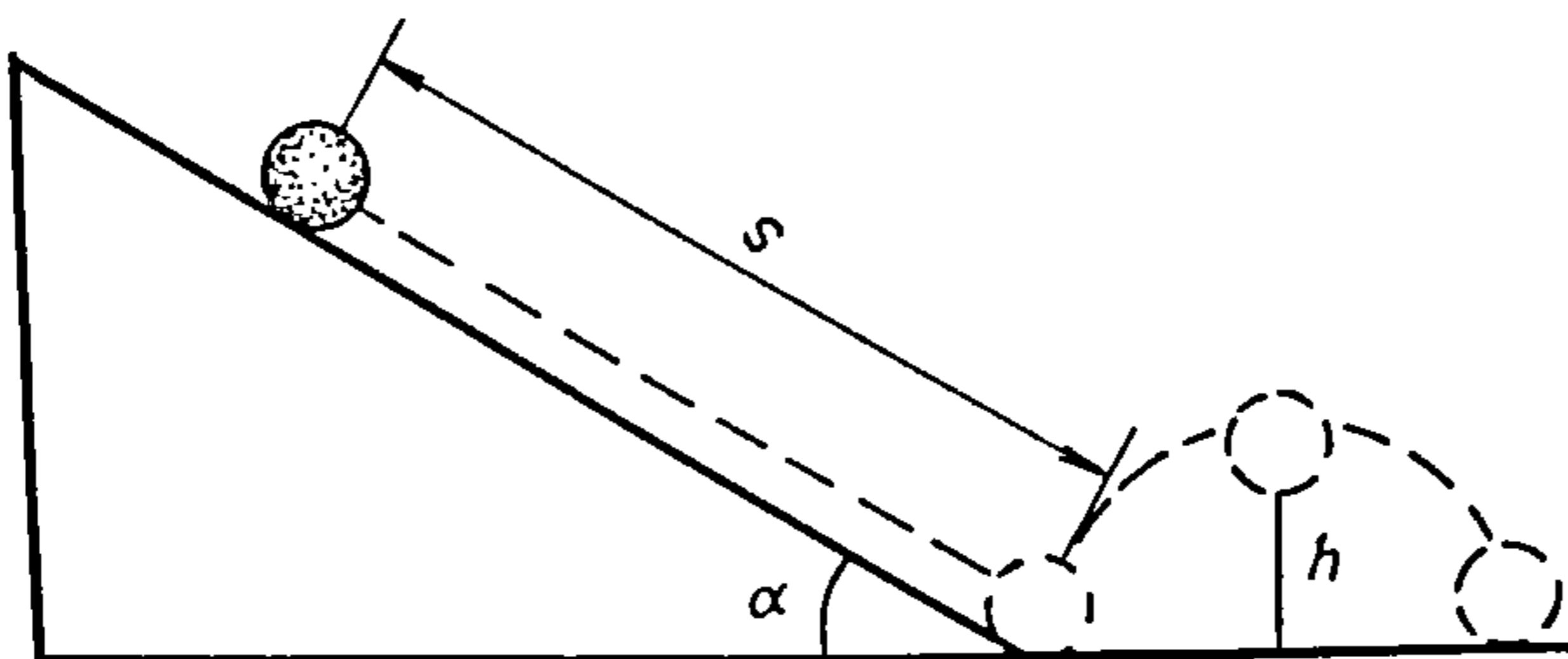
4.16. Знайсці карысную магутнасць рухавіка, што прыводзіць у рух платформу ў форме дыска масай  $m_1 = 280$  кг і радыусам  $R = 1,0$  м, на краі якой стаіць чалавек масай  $m_2 = 60$  кг, калі за  $t = 30$  с платформа набывае скорасць, што адпавядае частаце  $n = 1,2$  аб/с.

4.17. Дыск масай  $m_1 = 5$  кг і радыусам  $R = 5$  см, які верціцца з частатой  $n = 10$  аб/мін, прыводзіцца ў счапленне з нерухомым дыскам масай  $m_2 = 10$  кг такога ж радыуса. Вызначыць энергію, якая пойдзе на награванне дыскаў, калі пры іх счапленні слізганне адсутнічае.

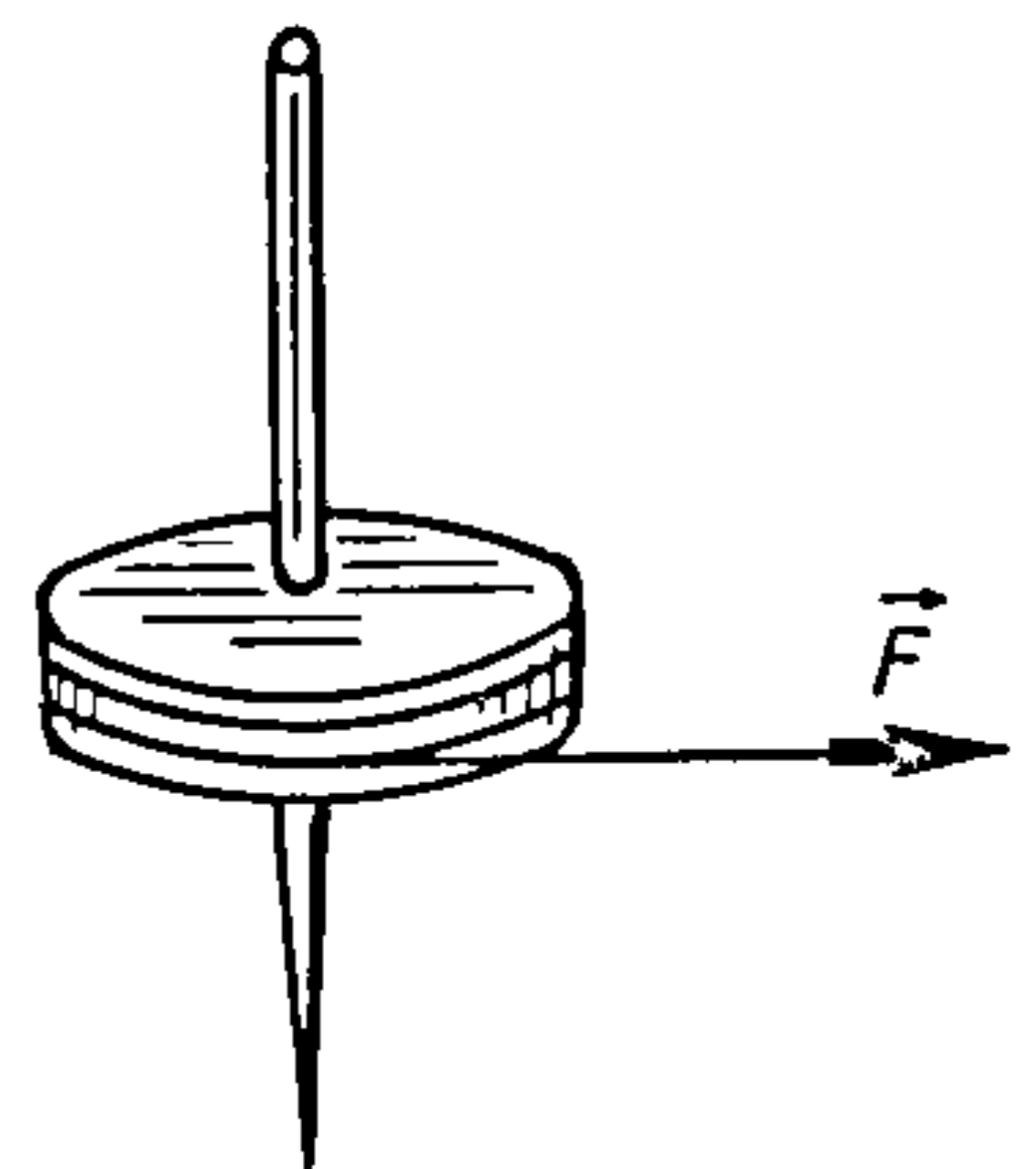
4.18. Пры наяўнасці трэння абруч скочваецца з нахільнай плоскасці, а калі яго адсутнічае, слізгае па ёй. У якім выпадку і ў колькі разоў скорасць абруча каля асновы нахільнай плоскасці будзе большая?

4.19. Шарык, які скочваецца без слізгання з нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 30^\circ$ , удараецца аб гарызантальную плоскасць і пасля ўдару падскоквае на вышыню  $h = 12,5$  см (рыс. 4.3). Лічачы ўдар абсалютна пругкім, вызначыць шлях  $s$ , пройдзены шарыкам па нахільнай плоскасці. Тэрне не ўлічваць.

4.20. Дыск радыусам  $R$  раскручваецца вакол вертыкальнай восі з дапамогай вярчэльнай даўжынёй  $l$ , якую цягнуць з пастаяннай сілай  $F$  (рыс. 4.4.). Пасля гэтага дыск саскоквае з восі і пападае на гарызантальную плоскасць. Колькі абаротаў зробіць дыск на плоскасці да поўнага спынення, калі яго маса  $M$ , а каэфіцыент трэння дыска аб плоскасць  $\mu$ ?



Рыс. 4.3



Рыс. 4.4

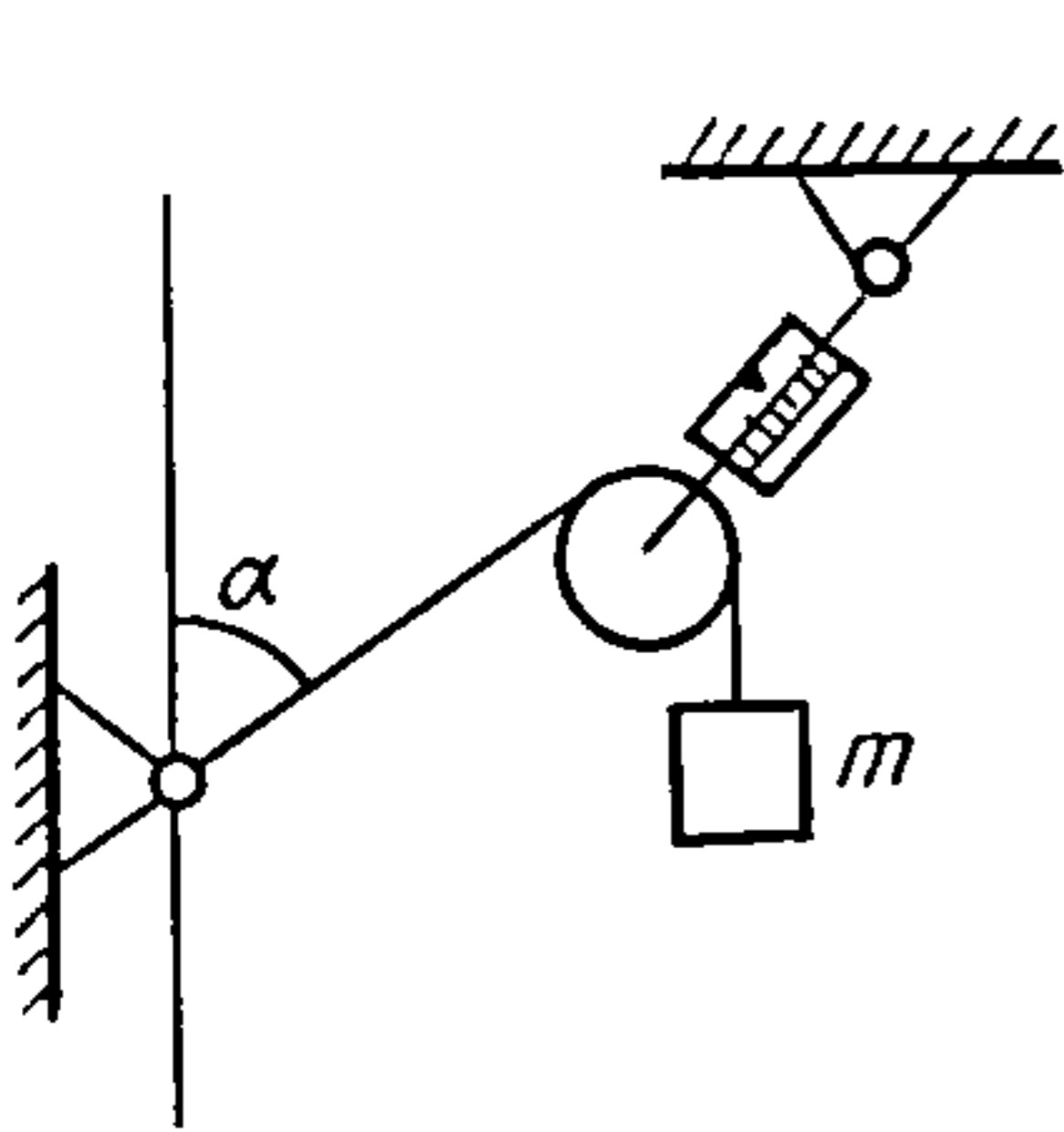
4.21. Два шари однакового памеру, зробленыя з алюмінію і медзі, верцяцца незалежна адзін ад аднаго вакол агульнай нерухомай восі, якая праходзіць праз іх цэнтры, з вуглавымі скарасцямі  $\omega_1 = 5,0$  рад/с і  $\omega_2 = 10,0$  рад/с. З якой вуглавай скарасцю будуць вярцецца абодва шары, калі іх жорстка злучыць?

### Раўнавага цвёрдага цела

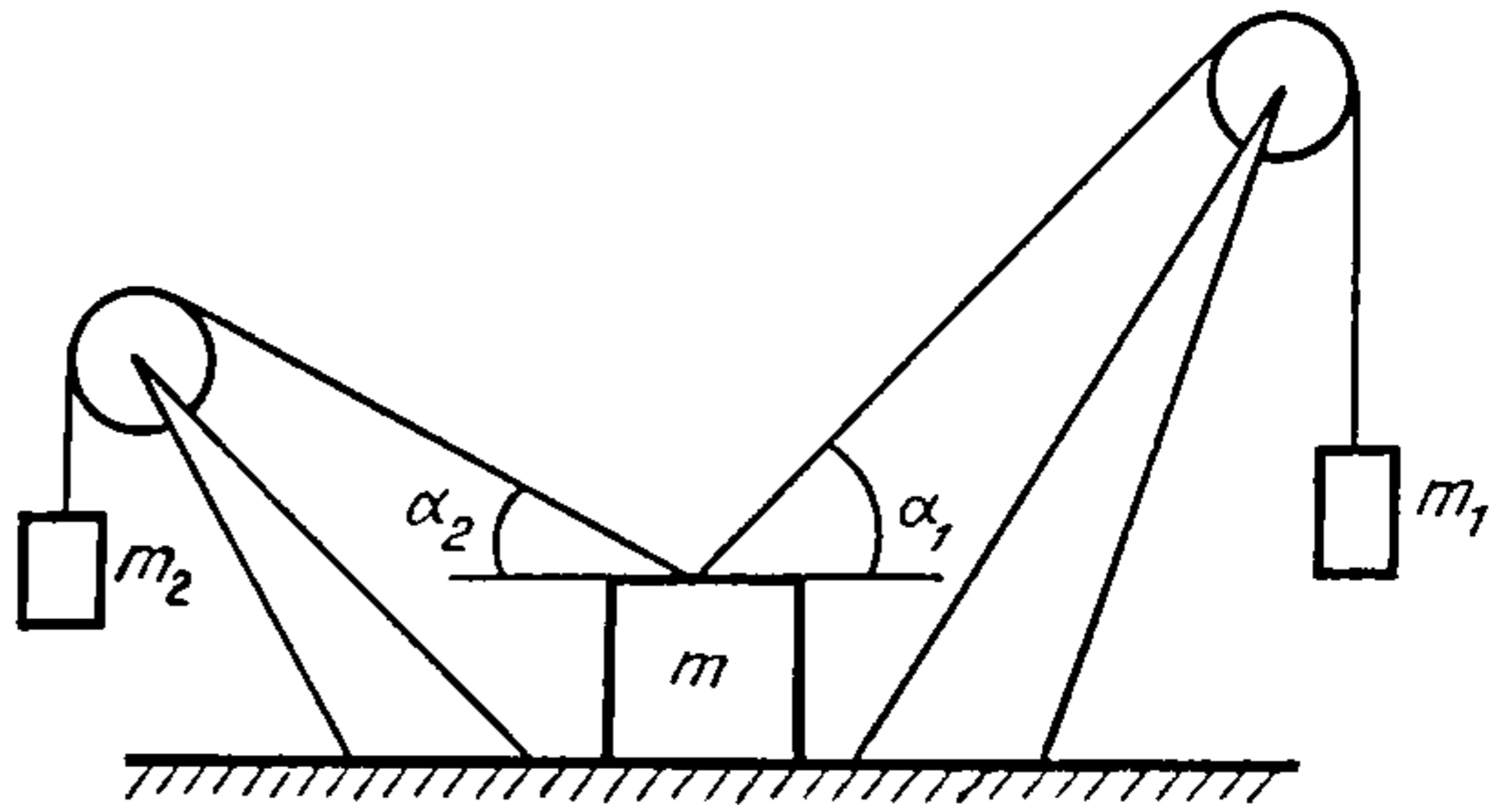
4.22. Аднародны стрыжань даўжынёй 1,0 м і масай 5,0 кг падвешаны гарызантальна на дзвюх паралельных вяроўках однаковай даўжыні. Да стрыжня прымацаваны груз масай 10 кг на адлегласці 0,25 м ад аднаго з яго канцоў. Вызначыць нацяжэнне вяровак.

4.23. Цераз блок, прымацаваны да дынамометра, перакінуты канацік. Адзін канец яго замацаваны так, што ўтварае вугал  $\alpha = 60^\circ$  з вертыкаллю (рыс. 4.5). На другім канцы падвешаны груз масай  $m = 5,0$  кг. Вызначыць паказанне дынамометра.

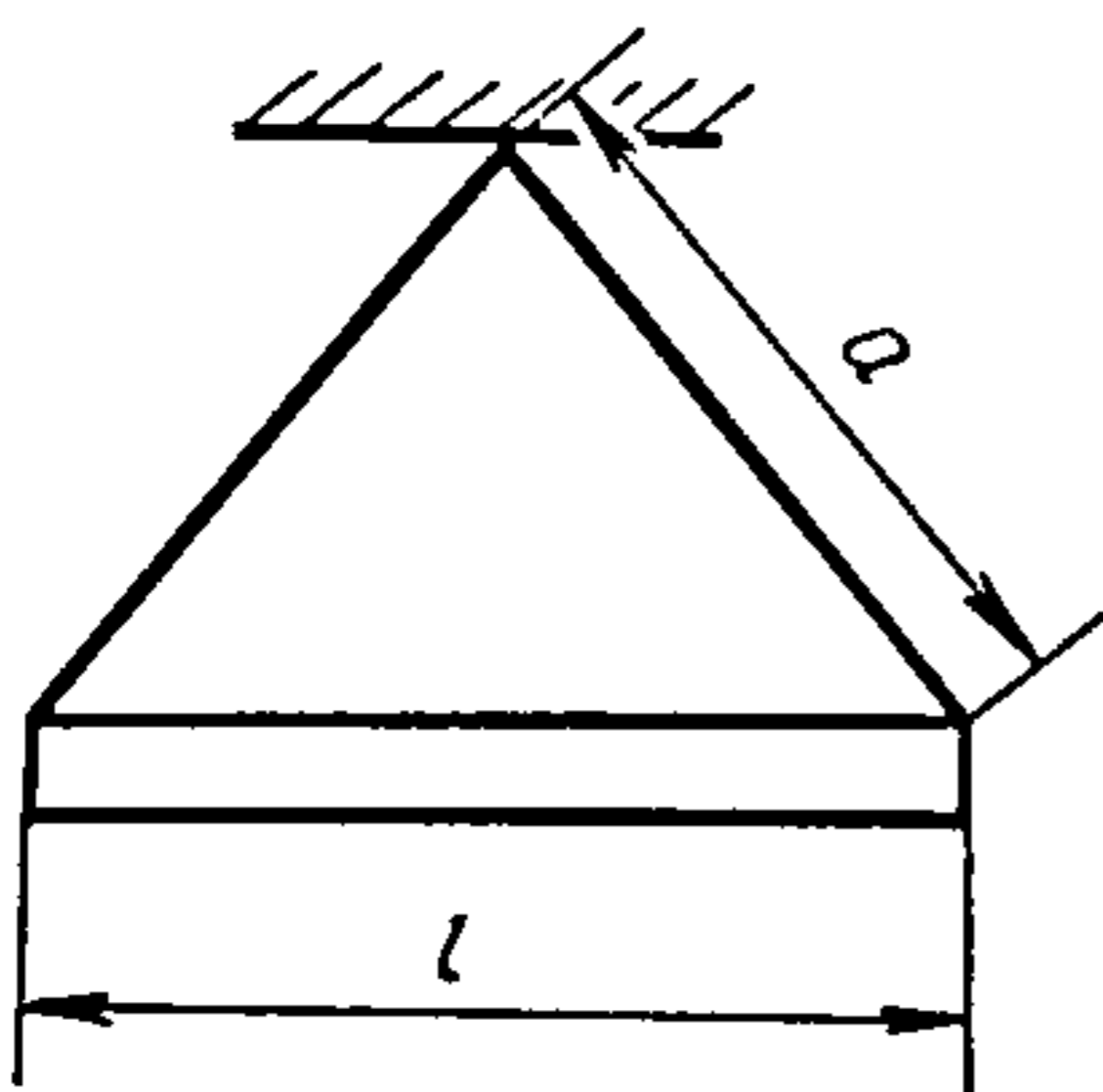
4.24. На гарызантальнай плоскасці ляжыць груз масай  $m = 10$  кг, да якога прымацаваны вяроўкі, перакінутыя цераз блокі (рыс. 4.6). На канцах вяровак падвешаны грузы  $m_1$  і  $m_2$ . Знайсці найбольшую масу грузу  $m_1$ , пры



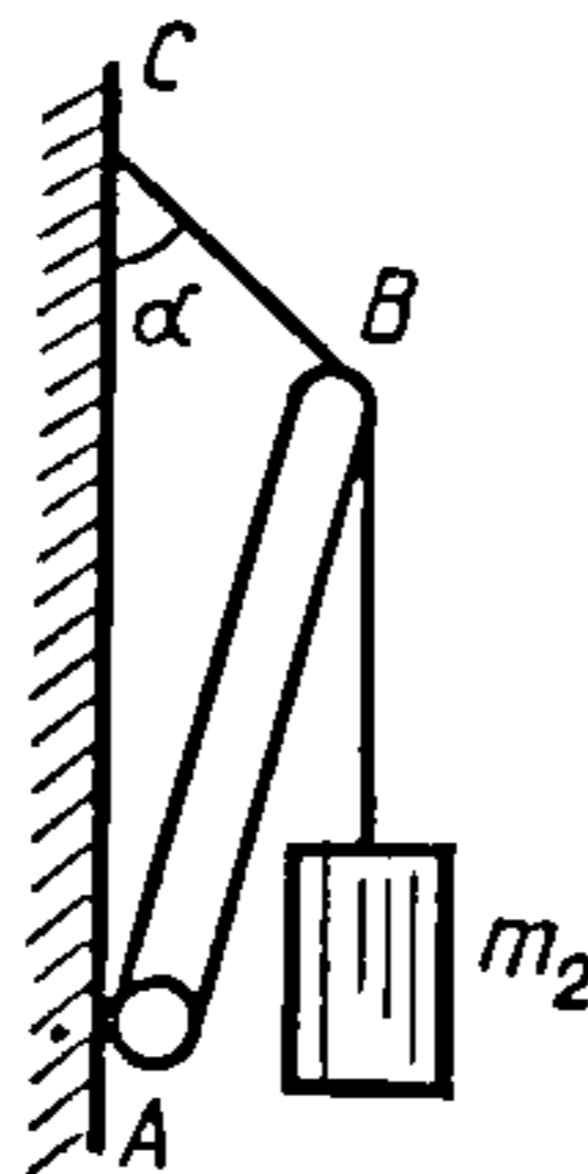
Рыс. 4.5



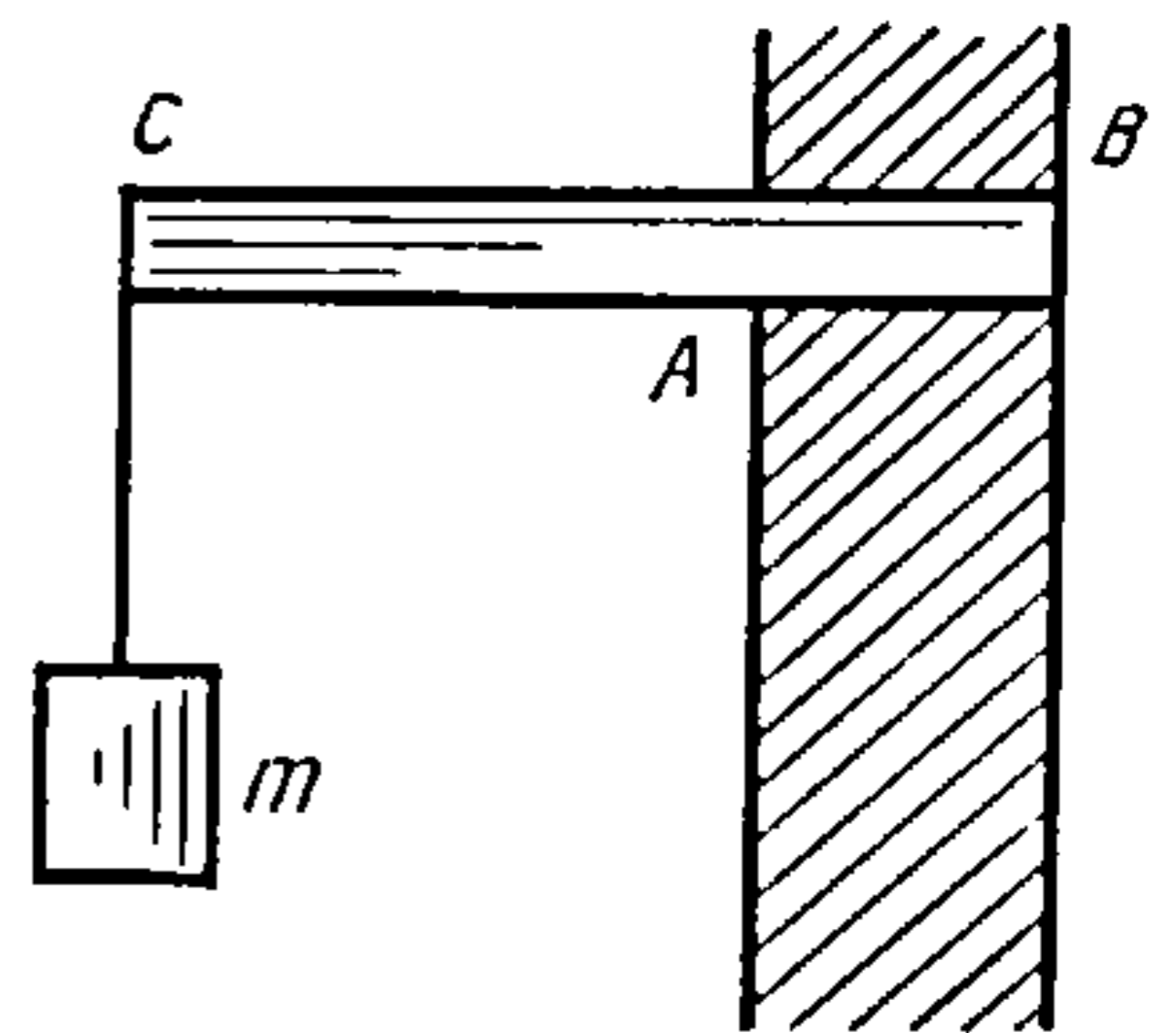
Рыс. 4.6



Рыс. 4.7



Рыс. 4.8



Рыс. 4.9



якой сістэма яшчэ будзе знаходзіцца ў раўнавазе, калі  $m_2 = 5,0$  кг,  $\alpha_1 = 45^\circ$ ,  $\alpha_2 = 30^\circ$  і каэфіцыент трэння груза аб гарызантальную плоскасць  $\mu = 0,50$ . Масы блокаў і вярвак і трэнне ў блоках не ўлічваюць.

4.25. Аднародны стрыжань масай  $m = 2,0$  кг падвешаны на дзвюх нітках аднолькавай даўжыні  $a = 50$  см (рыс. 4.7). Вызначыць даўжыню стрыжня, калі нацяжэнне нітак  $F = 30$  Н.

4.26. Стрыжань  $AB$  масай  $m_1 = 5,0$  кг шарнірна прымацаваны ніжнім канцом да вертыкальнай сценкі (рыс. 4.8). Да верхняга канца стрыжня, які прывязаны да сценкі вярвойкай  $CB$ , падвешаны груз масай  $m_2 = 3,0$  кг. Вызначыць нацяжэнне вярвойкі  $CB$ , калі вугал  $\alpha = 45^\circ$ , а даўжыня вярвойкі ў 2 разы меншая за даўжыню стрыжня.

4.27. На нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $35^\circ$  стаіць аднародны прамы цыліндр радыусам  $10$  см. Чаму роўная найбольшая вышыня цыліндра, пры якой ён яшчэ не перакуліўся?

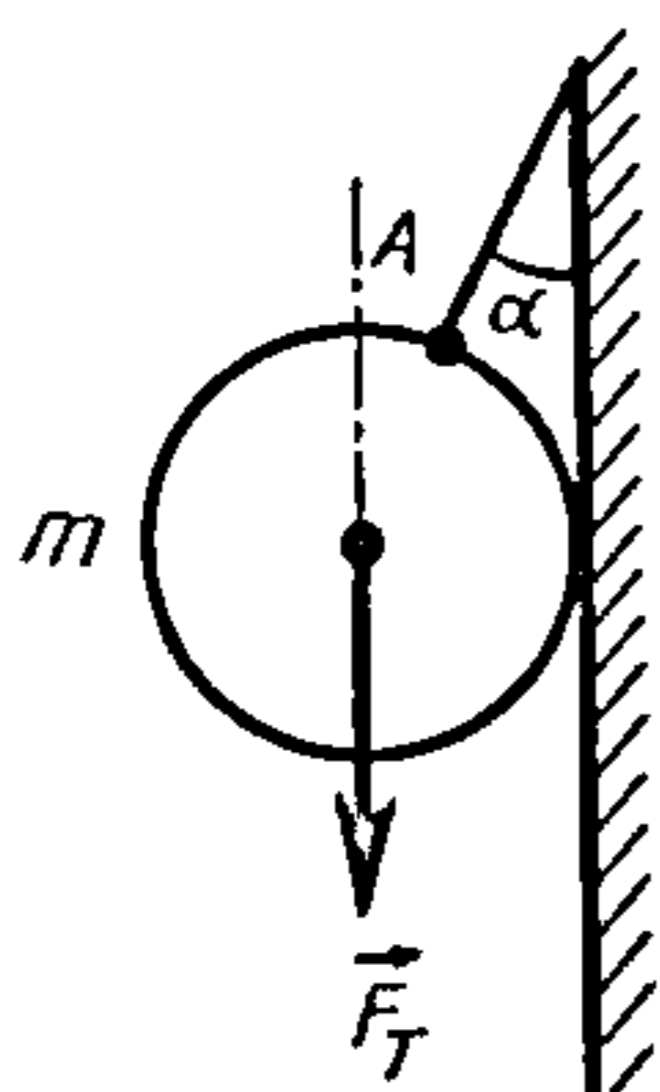
4.28. Аднародная гарызантальная бэлька даўжынёй  $1,5$  м і масай  $50$  кг замацавана ў сцяне таўшчынёй  $50$  см так, што апіраецца на яе ў пунктах  $A$  і  $B$  (рыс. 4.9). Да свабоднага канца бэлькі падвешаны груз масай  $100$  кг. Вызначыць сілы рэакцыі ў апорах  $A$  і  $B$ .

4.29. Аднародны шар масай  $2$  кг прымацаваны да вертыкальнай сцяны з дапамогай ніткі (рыс. 4.10). З якой сілай шар цісне на сцяну, калі нітка ўтварае з ёю вугал  $\alpha = 30^\circ$ ? Трэнне не ўлічваюць.

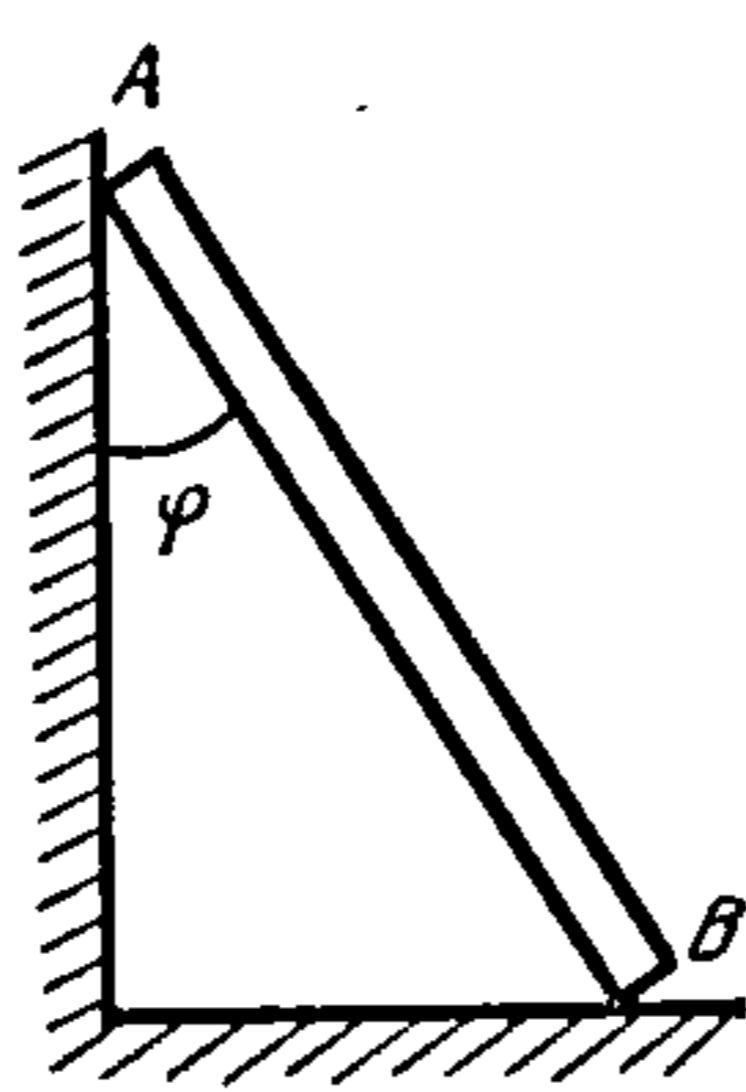
4.30. Пры якім найменшым каэфіцыенце трэння паміж сцяной і шарам (гл. рыс. 4.10) пункт  $A$ , у якім замацавана нітка, і цэнтр шара будуць знаходзіцца на адной вертыкалі?

4.31. Лесвіца  $AB$  аб'піраецца канцом  $A$  на вертыкальную гладкую сцяну, а канцом  $B$  на падлогу (рыс. 4.11). Каэфіцыент трэння лесвіцы аб падлогу  $\mu = 0,3$ . Чаму роўнае найбольшае значэнне вугла  $\varphi$ , утворанага лесвіцай з вертыкальнай сцяной, пры якім лесвіца будзе яшчэ знаходзіцца ў раўнавазе?

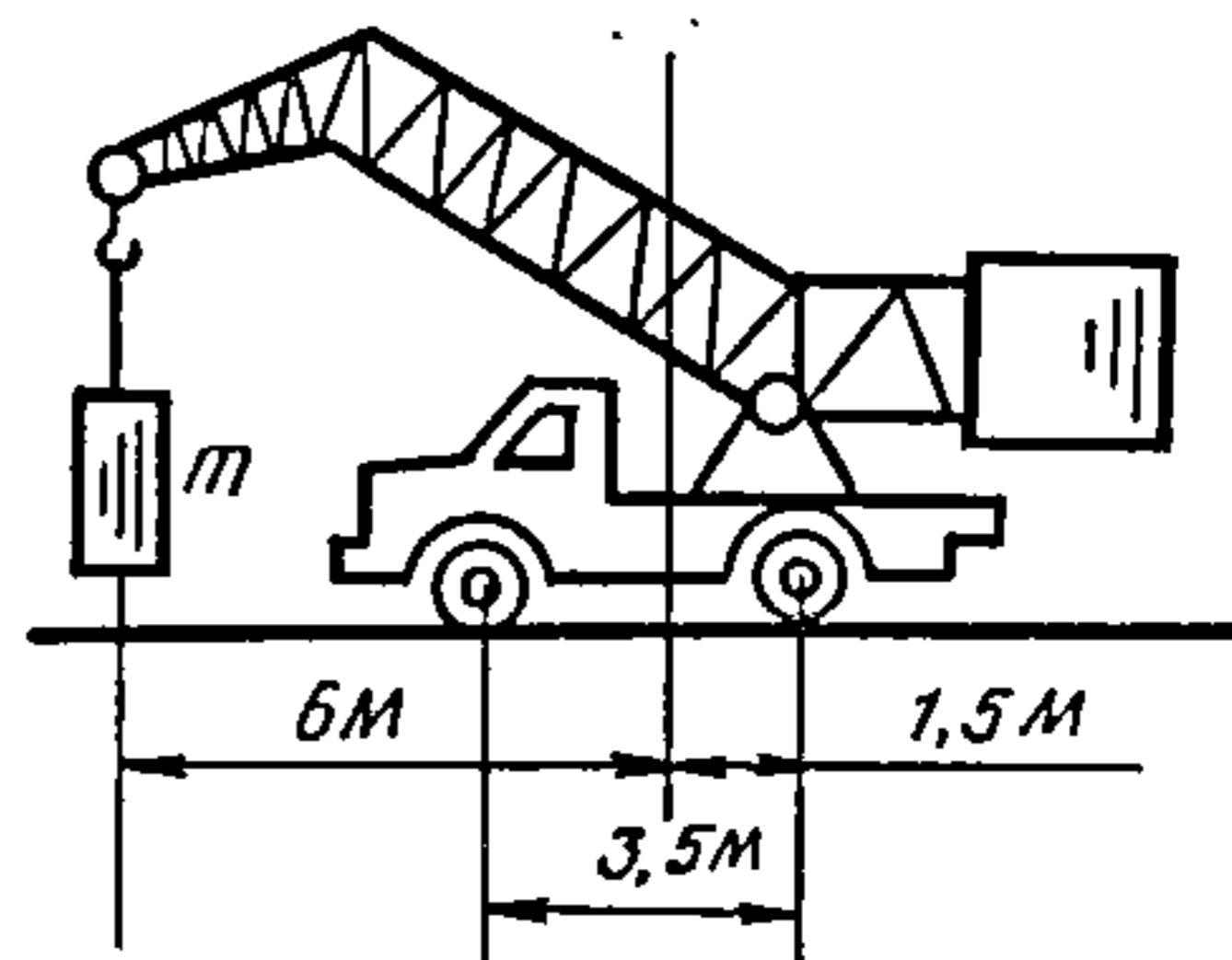
4.32. На грузавым аўтамабілі ўстаноўлены пад'ёмны кран (рыс. 4.12). Маса аўтамабіля разам з кранам  $3 \cdot 10^3$  кг. Адлегласць паміж восьмі перэдніх і задніх колаў  $3,5$  м. Які максімальны груз можа падняць гэты кран, калі



Рыс. 4.10



Рыс. 4.11



Рыс. 12

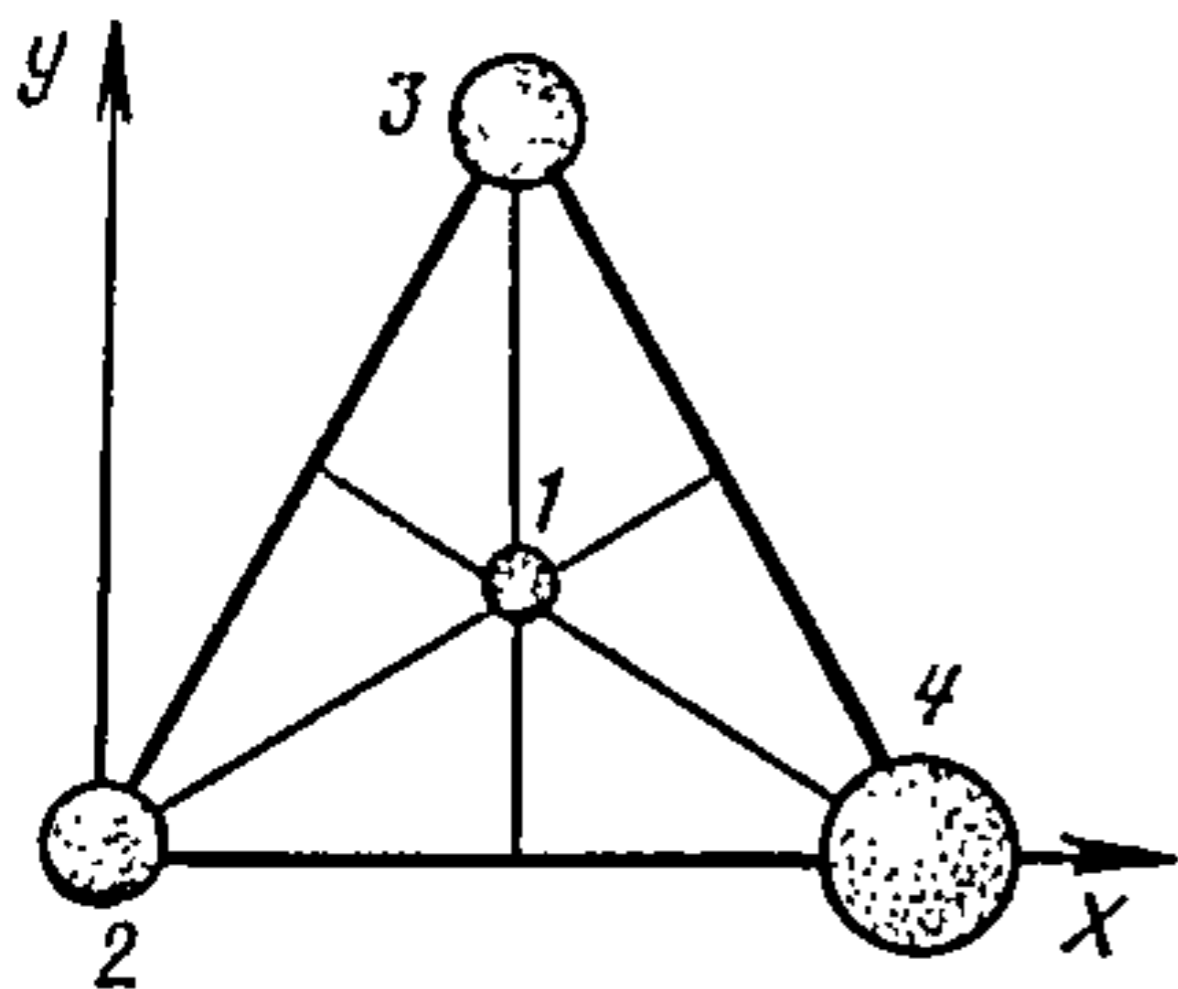


Рис.4.13

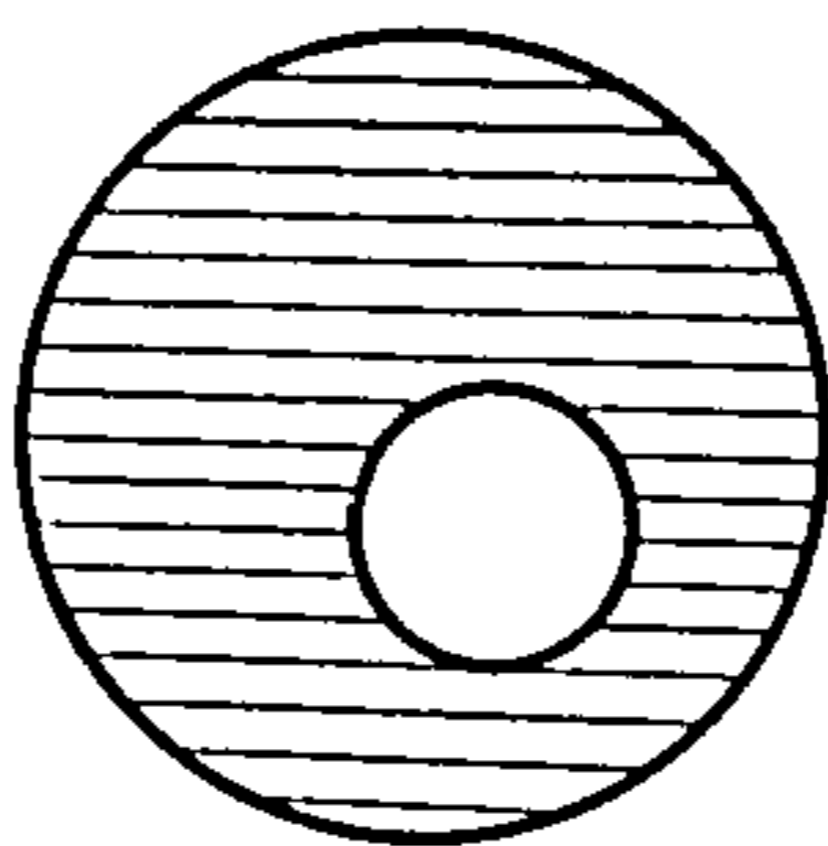


Рис.4.14

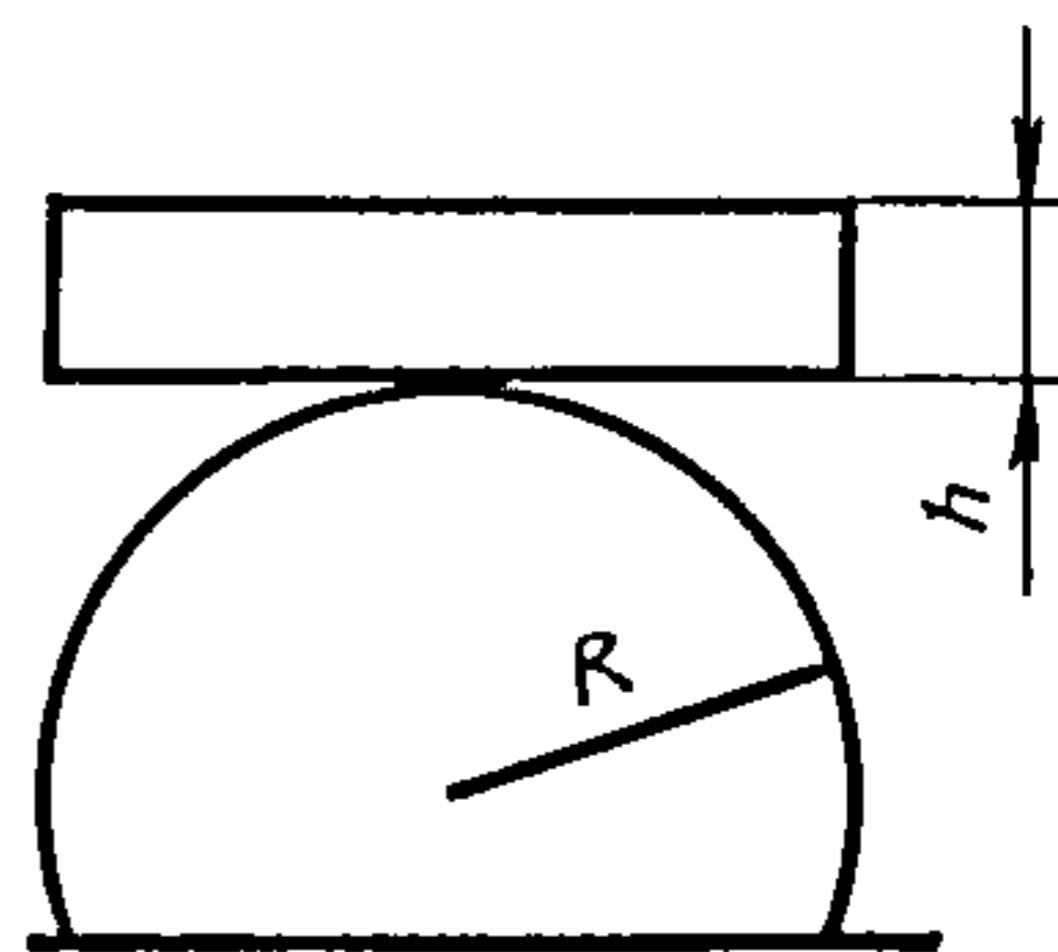


Рис.4.15

задняя ось і пункт, у яким падвешаны груз, знаходзяцца на адлегласцях 1,5 і 6 м ад вертыкальнай плоскасці, што праходзіць праз цэнтр мас аўтамабіля з кранам?

4.33. Знайсці каардынаты цэнтра мас сістэмы, складзенай з чатырох шарыкаў масамі  $m_2=200$ ,  $m_3=300$ ,  $m_4=400$  і  $m_1=100$  г, якія размешчаны ў вяршынях і ў цэнтры роўнастаронняга трохвугольніка са стараной 20 см. Каардынатыныя восі накіраваны так, як паказана на рыс. 4.13.

4.34. Вызначыць палажэнне цэнтра мас стрыжня, складзенага з дзвюх частак аднолькавага папярочнага сячэння, адна з якіх свінцовая, а другая жалезная, калі яго агульная даўжыня 0,50 м.

4.35. У аднародным дыску дыяметрам 60 см выразана круглая адтуліна дыяметрам 20 см, цэнтр якой знаходзіцца на адлегласці 8,0 см ад цэнтра дыска (рыс. 4.14). Вызначыць палажэнне цэнтра мас дыска.

4.36. Брусок таўшчынёй  $h$  ляжыць на нерухомым цыліндры радыусам  $R$  (рыс. 4.15). Пры якіх суадносінах паміж  $h$  і  $R$  брусок будзе знаходзіцца ў стане ўстойлівай раўнавагі? Лічыць, што трэнне паміж бруском і цыліндрам дастаткова вялікае.

## §5. МЕХАНІКА ВАДКАСЦЕЙ І ГАЗАЎ

Для стацыянарнага цячэння несціскальнай вадкасці справядліва ўраўненне неразрыўнасці струменя

$$vS = \text{const},$$

дзе  $v$  — скорасць вадкасці;  $S$  — плошча папярочнага сячэння трубкаі току.

Аб'ём вадкасці, якая працякае за адзінку часу праз любое сячэнне трубкаі току (расход),

$$Q = vS.$$

Скорасць выцякання ідэальнай вадкасці праз малую адтуліну ў шырокай пасудзіне

$$v = \sqrt{2gh},$$

дзе  $h$  — глыбіня адтуліны адносна ўзроўню вадкасці ў шырокай пасудзіне.

Ураўненне Бернулі

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gh = \text{const},$$

дзе  $p$  — статычны ціск вадкасці;  $\rho$  — шчыльнасць вадкасці;  $v$  — скорасць цячэння вадкасці;  $h$  — вышыня сячэння трубкаі току над некаторым узроўнем.

Пры пераходзе аб'ёму  $V$  вадкасці з прасторы, дзе ціск  $p_1$ , у прастору з ціскам  $p_2$  знешнім ціскам выконваецца работа

$$A = (p_2 - p_1)V.$$

Пры ламінарным цячэнні вадкасці змешчанае ў струмень дэла адчувае лабавое супраціўленне

$$F = r\eta v,$$

дзе  $r$  — каэфіцыент, які залежыць ад формы і памеру цела;  $\eta$  — вязкасць;  $v$  — скорасць струменя.

Пры руху шара ў вязкім асяроддзі сіла супраціўлення (формула Стокса)

$$F = 6\pi R\eta v,$$

дзе  $R$  — радыус шара.

Аб'ём  $V$  вадкасці, якая працякае праз трубу даўжынёй  $l$  і радыусам  $R$  пры ламінарным руху за час  $t$ , вызначаецца па формуле Пуазейля:

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{8l} \Delta p t,$$

дзе  $\Delta p$  — рознасць ціскаў на канцах трубки.

У выпадку турбулентнага струменя пры не вельмі вялікіх скорасцях лабавое супраціўленне

$$F = C_x S \rho v^2,$$

дзе  $C_x$  — каэфіцыент лабавага супраціўлення, які залежыць ад формы і ліку Рэйнальдса;  $S$  — плошча праекцыі цела на плоскасць, перпендыкулярную скорасці струменя;  $\rho$  — шчыльнасць асяроддзя.

Лік Рэйнальдса

$$Re = \frac{l \rho v}{\eta},$$

дзе  $l$  — велічыня, якая характарызуе лінейныя размеры цела.

## Гідра - і аэрастатыка

5.1. Вызначыць глыбіню, на якую неабходна пагрузіць у ваду паветраны пісталет калібру  $d = 7,0$  мм, каб пры націсканні на курок выстрал не адбыўся. Даўжыня ствала пісталета  $l = 22$  см. Маса кулі  $m = 7,0$  г, а яе скорасць у момант вылету са ствала пры выстрале ў паветры  $v = 27$  м/с.

5.2. Вызначыць нацяжэнне троса пры пад'ёме з вады жалезабетоннай пліты аб'ёмам  $2,4$  м<sup>3</sup> з паскарэннем  $0,5$  м/с<sup>2</sup>. Лабавое супраціўленне не ўлічваць. Лічыць шчыльнасць жалезабетону  $\rho_T = 2,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

5.3. Чаму роўны ККДз рухавіка, што прыводзіць у дзеянне гідраўлічны прэс, плошчы поршняў якога суадносяцца як 1:100, калі пры пад'ёме груза масай  $m = 5 \cdot 10^4$  кг малы поршань за  $t = 1,5$  мін зрабіў  $n = 100$  ходаў? Ход малога поршня  $h_1 = 20$  см. Магутнасць рухавіка  $N = 2,0$  кВт.

5.4. Два шары — алюмініевы і медны, адзін з якіх суцэльны, а другі полы, падвешаны да канцоў нераўнаплечага рычага і ўраўнаважаны ў паветры. Устаноўце, які з шароў з'яўляецца полым, калі пры пагрузэнні іх у сасуд з вадой раўнавага не парушаецца. Чаму роўны аб'ём поласці, калі маса меднага шара  $0,4$  кг?

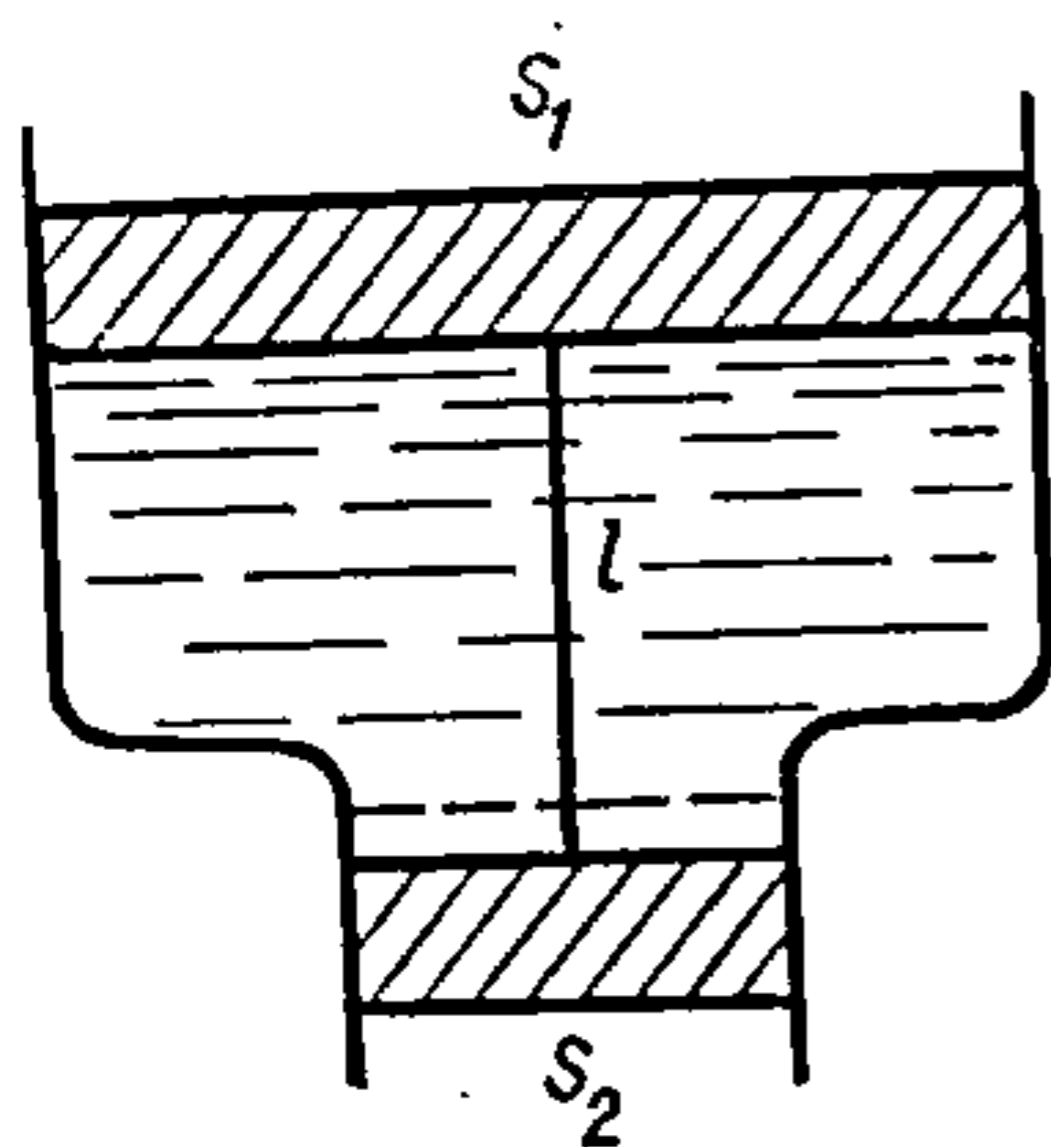


5.5. У сасуд з ртуццю і вадой кінуты стальны шарык. Якая частка аб'ёму шарыка будзе знаходзіцца ў вадзе?

5.6. Вызначыць масу коркавага пояса, які можа ўтрымаць чалавека масай  $m_1 = 60$  кг у вадзе так, каб галава і плечы ( $n = 1/8$  аб'ёму) не былі пагружаны ў ваду. Шчыльнасць цела чалавека лічыць роўнай  $\rho_1 = 1007$  кг/м<sup>3</sup>.

5.7. Сасуд з вадой рухаецца вертыкальна з паскарэннем  $a = 1,2$  м/с<sup>2</sup>, накіраваным ўверх. Вызначыць ціск на глыбіні  $h = 0,20$  м.

5.8. Да плаваючага ў вадзе коркавага пояса аб'ёмам  $V = 50$  дм<sup>3</sup> падвешана на нітцы жалезная гіра. Вызначыць масу гіры і нацяжэнне ніткі, калі ў ваду пагружана  $1/2$  аб'ёму пояса.



Рыс.5.1

5.9. Дзве вертыкальна размешчаныя трубы, сячэнні якіх  $S_1$  і  $S_2$ , злучаны паміж сабой і закрыты бязважкімі поршнямі, што звязаны тонкай бязважкай ніццю даўжынёй  $l$  (рыс. 5.1). Прастора паміж поршнямі запоўнена вадой шчыльнасцю  $\rho$ . Знайсці нацяжэнне ніткі, калі канцы сасудаў адкрыты ў атмасферу.

5.10. Бензавоз, цыстэрна якога запоўнена бензінам, рухаўся са скорасцю  $v = 36$  км/гадз. і, затармазіўшы, спыніўся за  $t = 10$  с. Вызначыць, у колькі разоў сіла ціску на пярэднюю сценку цыстэрны ў час тармажэння большая, чым на заднюю, калі цыстэрну можна лічыць прамавугольным паралелепіпедам даўжынёй  $l = 3,0$  м. Вышыня бензіну ў ёй  $h = 0,50$  м.

### Гідра- і аэрадынаміка

5.11. У шырокім цыліндрычным сасудзе, напоўненым вадой да ўзроўню 75 см, ёсць дзве адтуліны, праз якія б'юць струмені вады. Ніжняя адтуліна знаходзіцца на вышыні 25 см. На якой вышыні змешчана верхняя адтуліна, калі абодва струмені перасякаюць гарызантальную плоскасць, што знаходзіцца на ўзроўні дна сасуда, у адным пункце?

5.12. Бак у тэндэры паравоза даўжынёй  $l = 4,0$  м запоўнены вадой. У задняй сценцы бака на вышыні  $h = 1,0$  м ад верхняга ўзроўню вады ўтварылася дзірка, праз якую выцякае струмень вады. Вызначыць скорасць струменя, калі паравоз рухаецца з паскарэннем  $a = 0,50$  м/с<sup>2</sup>. Чаму роўная скорасць струменя пры тармажэнні з такім жа паскарэннем?

5.13. У шырокім сасудзе, запоўненым вадой, на вышыні  $h = 0,1$  м ёсць адтуліна сячэннем  $S = 2$  см<sup>2</sup>, праз якую выцякае струмень вады. Да сасуда зверху падведзена труба, па якой паступае вада так, што яе ўзровень у сасудзе застаецца нязменным. Колькі вады штосекундна павінна ўлівацца ў сасуд, каб струмень, што выцякае праз адтуліну, дасягаў узроўню дна

сасуда ў пункце, які знаходзіцца на адлегласці  $l = 0,5$  м ад краю сасуда?

5.14. Вядро з вадой падвешана на спружыне і робіць вертыкальныя гарманічныя ваганні з перыядам  $2,0$  с і амплітудай  $10$  см. Праз адтуліну ў сярэдзіне дна вядра выцякае струмень вады. Вызначыць найбольшую і найменшую скорасці выцякання вады праз адтуліну, калі ўзровень яе ў вядры  $10$  см.

5.15. Па трубе сячэннем  $S = 4,0$  см<sup>2</sup>, сагнутай пад прамым вуглом, цячо вада. З якой сілай вада дзейнічае на трубу, калі штосекундны расход яе  $Q = 2,0$  кг/с?

5.16. Якую сілу неабходна прыкласці да поршня гарызантальна размешчанай спрынцоўкі, каб струмень вады, што выцякае з яе, меў скорасць  $v = 10$  м/с? радыус поршня  $R = 2,0$  см. Трэне не ўлічваць.

5.17. Якое супраціўленне аказвае паток паветра, што набягае на аўтамабіль пры скорасці руху  $144$  км/гадз., калі плошча лабавой паверхні  $3,0$  м<sup>2</sup>? Каэфіцыент лабавога супраціўлення лічыць роўным  $C_x = 0,6$ .

5.18. Якую магутнасць развівае рухавік матацыкла, калі пры сустрэчным ветры  $v_1 = 10$  м/с матацыкліст едзе са скорасцю  $v_2 = 20$  м/с? Маса матацыкліста разам з матацыклам  $m = 200$  кг, каэфіцыент трэння  $\mu = 0,20$ , агульная плошча лабавой паверхні  $S = 1,2$  м<sup>2</sup>.

5.19. Вызначыць магутнасць паветранага патоку, які набягае на электрацягнік, што рухаецца са скорасцю  $100$  км/гадз., калі плошча лабавой паверхні  $10$  м<sup>2</sup>.

5.20. Праз гарызантальна размешчаную трубу пераменнага сячэння штомінутна праходзіць вада аб'ёмам  $2$  м<sup>3</sup>. Вызначыць рознасць узроўняў вады ў манаметрычных трубах у месцах сячэнняў дыяметрамі  $0,3$  і  $0,1$  м.

5.21. Вызначыць скорасць цячэння вады ў шырокай частцы гарызантальна размешчанай трубы пераменнага сячэння, калі радыус вузкай часткі ў  $3$  разы меншы за радыус шырокай часткі, а рознасць ціскаў у шырокай і вузкай частках трубы  $\Delta p = 10$  кПа.

5.22. Якую магутнасць развівае сэрца чалавека, калі пры кожным удары левы жалудачак, скарачваючыся, выштурхоўвае ў аорту кроў масай  $m = 70$  г пад ціскам  $p = 26$  кПа, а за  $t = 1$  мін адбываецца прыблізна  $n = 75$  скарачэнняў жалудачка?

5.23. Вызначыць работу, выконваемую пры перамяшчэнні вады аб'ёмам  $2$  м<sup>3</sup> у гарызантальнай трубе пераменнага сячэння пры ціску на яе канцах  $50$  і  $20$  кПа.

5.24. Шкляны шарык радыусам  $0,50$  мм падае ў вялікім сасудзе з гліцэрынам са скорасцю  $5,0$  см/с. Знайсці вязкасць гліцэрына, калі яго шчыльнасць  $1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, а шчыльнасць шкла  $2,7 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

5.25. Чан ёмістасцю  $V = 2,0$  м<sup>3</sup> трэба запоўніць вадой за  $t = 5,0$  мін. Вызначыць найменшы радыус трубы, якая можа быць выкарыстана для злучэння чана з воданепорнай вежай, што знаходзіцца на адлегласці  $l = 500$  м, калі ўзровень вады ў вежы на  $h = 20$  м вышэйшы за ўзровень адтуліны ў чане.



5.26. Якая сіла супраціўлення дзейнічае на шар дыяметрам 0,50 м, што рухаецца ў паветры са скорасцю 10 м/с? Лічыць каэфіцыент лабавога супраціўлення для шара  $C_x = 0,25$ .

5.27. Вылічыць максімальную скорасць патока вады ў трубе дыяметрам 2,0 см, пры якой цячэнне будзе заставацца ламінарным. Крытычнае значэнне ліку Рэйнольдса для трубы прыблізна роўнае 3000. Якая адпаведная скорасць для трубка дыяметрам 0,10 см?

5.28. Адзін з метадаў вызначэння вязкасці вадкасцей заключаецца ў вымярэнні скорасці падзення шарыка ў цыліндры, які запоўнены даследуемай вадкасцю, і вылічэнні  $\eta$  па формуле Стокса. Прымаючы для шара крытычнае значэнне ліку Рэйнольдса  $Re = 0,05$ , знайсці максімальны радыус стальнага шарыка, які можа быць выкарыстаны ў доследзе пры вызначэнні вязкасці гліцэрыну.

5.29. На вышыні  $h = 200$  км шчыльнасць атмасферы роўная  $\rho = 1,6 \times 10^{-10}$  кг/м<sup>3</sup>. Ацаніць сілу супраціўлення, якую адчувае спадарожнік папярочным сячэннем  $S = 0,50$  м<sup>2</sup> і масай  $m = 10$  кг, што рухаецца на гэтай вышыні.

5.30. У сасудзе знаходзяцца дзве ідэальныя вадкасці шчыльнасцямі  $\rho_1$  і  $\rho_2$ , якія не змешваюцца. Таўшчыня слаёў адпаведна роўная  $h_1$  і  $h_2$ . З паверхні вадкасці ў сасуд апускаюць шарык. Вызначыць шчыльнасць рэчыва шарыка, калі вядома, што ён дасягае дна сасуда у той момант, калі скорасць становіцца роўнай нулю.

## §6. НЕІНЕРЦЫЯЛЬНЫЯ СІСТЭМЫ АДЛІКУ. СІЛЫ ІНЕРЦЫІ

У сістэме адліку, што рухаецца адносна якой-небудзь інерцыяльнай сістэмы паступальна і прамалінейна з паскарэннем  $\vec{a}$ , на цела дзейнічае сіла інерцыі

$$F_{iH} = -m\vec{a}.$$

У сістэме адліку, што верціцца з пастаяннай вуглавой скорасцю адносна якой-небудзь інерцыяльнай сістэмы, дзейнічаюць цэнтрабежная сіла інерцыі

$$F_{цб} = m\omega^2 \vec{R}$$

і сіла Карыюліса

$$\vec{F}_K = 2m [\vec{v}', \vec{\omega}],$$

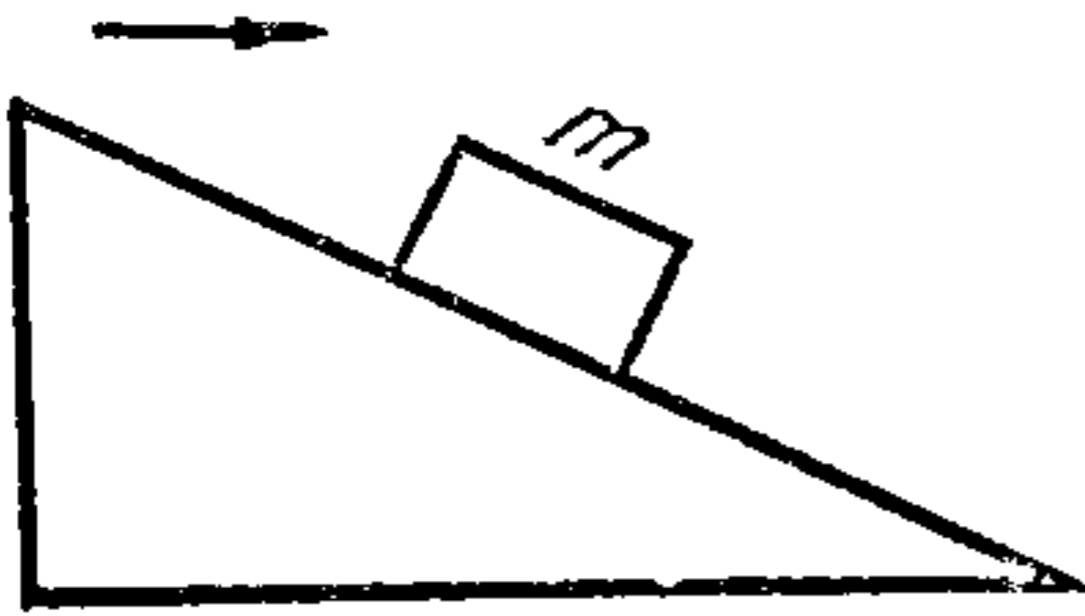
дзе  $\vec{R}$  — радыус-вектар, праведзены ад восі вярчэння да цэнтра мас цела;  $\vec{v}'$  — скорасць цела адносна неінерцыяльнай сістэмы.

6.1. Вызначыць скорасць электрацягніка ў момант пачатку тармажэння (лічыць яго рух роўназапаволеным), калі вядома, што ён спыніўся пасля праходжання шляху  $s = 200$  м, прычым нітка, на якой быў падвешаны ў вагоне груз, адхілілася ад вертыкалі на вугал  $\alpha = 5^\circ$ .

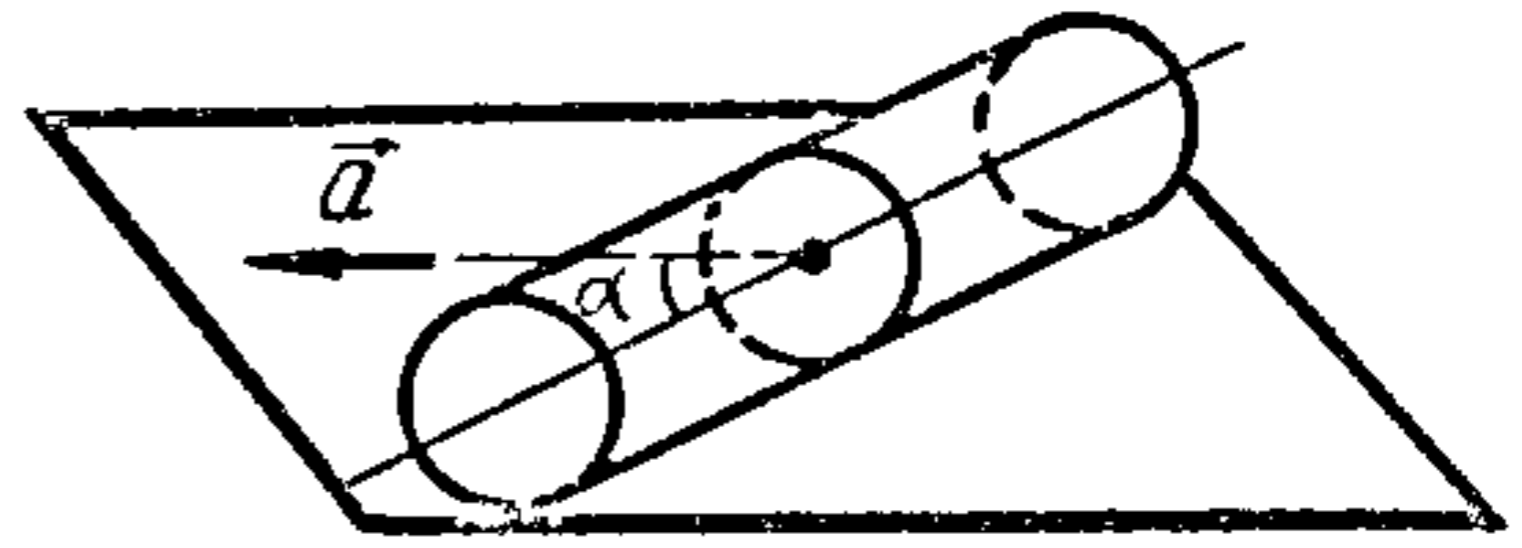
6.2. З якім паскарэннем павінна рухацца ў гарызантальным напрамку нахільная плоскасць з вуглом нахілу  $\alpha = 30^\circ$ , каб пры адсутнасці трэння цела, што знаходзіцца на ёй, не рухалася адносна нахільнай плоскасці?

6.3. З якім найменшым гарызантальна накіраваным паскарэннем павінна рухацца нахільная плоскасць з вуглом нахілу  $\alpha$ , каб цела, што





Рыс.6.1



Рыс.6.2

ляжыць над ёй, падымалася па нахільнай плоскасці? Каэфіцыент трэння паміж цэлам і нахільнай плоскасцю  $\mu$ .

6.4. На нахільнай плоскасці з вуглом нахілу  $\alpha = 10^\circ$  ляжыць цела. Нахільная плоскасць рухаецца з паскарэннем  $a = 1 \text{ м/с}^2$ , накіраваным гарызантальна, як паказана на рыс. 6.1. Знайсці найменшы каэфіцыент трэння  $\mu$  паміж цэлам і нахільнай плоскасцю, пры якім цела не слізгае па ёй. Чаму павінен быць роўным гэты каэфіцыент трэння, калі паскарэнне нахільнай плоскасці будзе накіравана ў процілеглы бок?

6.5. У гарызантальна размешчанай трубцы знаходзіцца шарык (рыс. 6.2). Які шлях пройдзе шарык за час  $t = 1 \text{ с}$ , калі трубка будзе рухацца ў гарызантальным напрамку з паскарэннем  $a = 2,0 \text{ м/с}^2$ , накіраваным пад вуглом  $\alpha = 45^\circ$  да трубкі? Каэфіцыент трэння слізгання паміж шарыкам і трубкай  $\mu = 0,20$ .

6.6. На гарызантальна размешчаным дыску, які верціцца вакол вертыкальнай восі, на адлегласці  $R = 8 \text{ см}$  ад восі вярчэння ляжыць цела. Вызначыць каэфіцыент трэння паміж дыскам і цэлам, калі пры вуглавой скорасці  $\omega = 5 \text{ рад/с}$  цела пачынае слізгаць па паверхні дыска.

6.7. Па гарызантальным адрэзку дарогі едзе веласіпедыст, апісваючы дугу радыусам  $10 \text{ м}$ . Пад якім вуглом да гарызонта нахілены веласіпедыст, калі яго скорасць  $6,0 \text{ м/с}$ ?

6.8. З якой найменшай скорасцю можа ехаць матацыкліст па ўнутранай вертыкальнай сцяне цыліндрычнай пабудовы радыусам  $R = 12 \text{ м}$ , апісваючы гарызантальную акружнасць, калі каэфіцыент трэння пакрышак аб сцяну  $\mu = 0,50$ , а цэнтр мас матацыкліста і матацыкла знаходзіцца на адлегласці  $l = 1,0 \text{ м}$  ад сцяны?

6.9. Гарызантальна размешчаны стрыжань даўжынёй  $l_1 = 0,5 \text{ м}$  верціцца з пастаяннай вуглавой скорасцю  $\omega = 2 \text{ рад/с}$  адносна вертыкальнай восі, што праходзіць праз яго сярэдзіну. На стрыжань надзеты дзве невялікія муфты, якія звязаны ніткай даўжынёй  $l_2 = 10 \text{ см}$  і размешчаны сіметрычна адносна восі вярчэння. З якой скорасцю адносна стрыжня муфты будуць рухацца да яго канцоў, калі нітку перапаліць? Трэне не ўлічваць.

6.10. Даказаць, што ў сасудзе, які верціцца вакол вертыкальнай восі, паверхня вадкасці мае форму парабалоіда вярчэння.

6.11. У цэнтры гарызантальна размешчанага дыска радыусам  $R = 2 \text{ м}$  устаноўлена мішэнь, а на яго краі — паветраны пісталет. Пры нерухомым дыску шарык трапляе ў цэнтр мішэні. Калі дыск верціцца з пастаяннай

вуглавой скорасцю  $\omega = 0,5$  рад/с вакол вертыкальнай восі, якая праходзіць праз яго цэнтр, то шарык трапляе ў пункт мішэні, адхілены ад яе цэнтра на  $s = 10$  см. Вызначыць скорасць шарыка.

6.12. Электравоз масай  $1 \cdot 10^5$  кг рухаецца з поўначы на поўдзень у паўночным паўшар'і па гарызантальным прамалінейным шляху са скорасцю 30 м/с на шыраце  $60^\circ$ . Вызначыць гарызантальную складаючую сілы, з якой электравоз цісне на рэйкі.

6.13. Вызначыць, на колькі зменіцца сіла, што дзейнічае на паверхню Зямлі, калі цела масай  $m$ , якое рухаецца ўздоўж экватара з усходу на захад са скорасцю  $v$ , зменіць напрамак руху на процілеглы.

6.14. На геаграфічнай шыраце  $\varphi = 60^\circ$  цела свабодна падае на зямлю з вышыні  $h = 200$  м. Вызначыць адхіленне цела пад дзеяннем карыалісавай сілы інерцыі, выкліканай вярчэннем Зямлі.

6.15. У пункце, размешчаным на шыраце  $\varphi = 60^\circ$ , з ружжа быў зроблены выстрал строга вертыкальна ўверх. Праз некаторы час куля ўпала на Зямлю. Вызначыць, на колькі адхілілася ўпаўшая куля ад пункта выстралу, калі яе пачатковая скорасць  $v_0 = 200$  м/с. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

6.16. У Санкт-Пецярбургу ў Ісаакіеўскім саборы ўстаноўлены маятнік Фуко, даўжыня якога 98 м. На які вугал павернецца плоскасць ваганняў маятніка за прамежак часу 10 мін? Геаграфічная шырата Санкт-Пецярбурга  $60^\circ$ . Рашыць задачу ў дзвюх сістэмах адліку: неінерцыяльнай і геліяцэнтрычнай.

## §7. ЭЛЕМЕНТЫ СПЕЦЫЯЛЬНАЙ ТЭОРЫІ АДНОСНАСЦІ

Пераўтварэнні Лорэнца:

$$x' = \frac{x - ut}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y,$$

$$z' = z, \quad t' = \frac{(u/c^2)x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

дзе  $c$  — скорасць святла ў вакууме. Скарачэнне даўжыні рухомага цела:

$$l' = l \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

дзе  $l'$  — даўжыня рухомага цела,  $l$  — яго ўласная даўжыня.

Запавольванне ходу рухомага гадзінніка

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2},$$

дзе  $\Delta t'$  — інтэрвал часу паміж падзеямі ў рухомай сістэме адліку,  $\Delta t$  — інтэрвал часу паміж тымі ж падзеямі ў нерухомай сістэме.

\* Штрыхі адносяцца да прасторава-часавых каардынат сістэмы адліку, якая рухаецца адносна нерухомай сістэмы каардынат са скорасцю  $u$  у дадатным напрамку восі  $X$ , прычым восі  $X'$  і  $X$  супадаюць, а восі  $Y'$  і  $Y$ ,  $Z'$  і  $Z$  — паралельныя.

Рэлятывісцкі закон складання скорасцей:

$$u_x = \frac{u_x + v}{1 + vu'_x/c^2};$$

$$u_y = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2} u'_y}{1 + vu'_x/c^2};$$

$$u_z = \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2} u'_z}{1 + vu'_x/c^2}.$$

дзе  $u_x, u_y, u_z$  — праекцыі скорасцей у нерухомай сістэме каардынат;  $u'_x, u'_y, u'_z$  — праекцыі скорасцей у рухомай сістэме.

Квадрат інтэрвалу паміж падзеямі 1 і 2 — інварыянтная велічыня:

$$S_{12}^2 = c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2,$$

дзе  $t_{12}$  — інтэрвал часу паміж падзеямі 1 і 2;  $l_{12}$  — адлегласць паміж пунктамі 1 і 2, у якіх адбыліся гэтыя падзеі.

Рэлятывісцкая маса і імпульс:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

дзе  $m$  — маса спакою.

Поўная энергія цела

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

дзе  $E_0 = m_0 c^2$  — энергія спакою.

Кінетычная энергія рухомага цела

$$E_k = E - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right).$$

7.1. Атрымаць адваротныя пераўтварэнні Лорэнца:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y = y',$$

$$z = z', \quad t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}.$$

7.2. Стрыжань рухаецца з некаторай пастаяннай скорасцю  $v$ . Яго даўжыня ў нерухомай сістэме  $l_1 = 3,0$  м, а ў сістэме адліку, звязанай са стрыжнем,  $l_2 = 6,0$  м. Вызначыць уласную даўжыню стрыжня і яго скорасць адносна нерухомай сістэмы адліку.



7.3. Скорасць руху Зямлі вакол Сонца  $v = 30$  м/с. Знайсці скарачэнне дыяметра Зямлі ў сістэме каардынат, звязанай з Сонцам.

7.4. Рэактыўны самалёт ляціць са скорасцю 1000 м/с. На колькі гадзіннік, які знаходзіцца ў самалёце, будзе адставаць ад гадзінніка на Зямлі?

7.5. Адзін з блізнят у ва ўзросце 20 гадоў адправіўся ў далёкае касмічнае падарожжа да зоркі Арктур на караблі са скорасцю  $v = 0,99$  с. Для жыхароў Зямлі адлегласць да гэтай зоркі складае 40 св. гадоў (г. зн. адлегласць такая, што свет ад зоркі даходзіць да Зямлі за 40 гадоў). На колькі гадоў касмічны падарожнік стане маладзейшым за свайго брата, які застаўся на Зямлі?

7.6. Выкарыстоўваючы пераўтварэнні Лорэнца, вывесці рэлятывісцкі закон складання скарасцей.

7.7. Выкарыстоўваючы формулы тэорыі адноснасці, даказаць, што шляхам складання скарасцей нельга атрымаць скорасці, большыя за скорасць святла.

7.8. Зорка рухаецца да Зямлі са скорасцю  $v$  і выпраменьвае фатон, скорасць якога  $c$ . Паказаць, што фатон прыбліжаецца да Зямлі са скорасцю  $c$ , а не  $c + v$ .

7.9. Дзве ракеты аддаляюцца ад Зямлі ў прама процілеглых напрамках са скорасцю 0,8 с адносна Зямлі. Знайсці, з якой скорасцю рухаецца адна з ракет у сістэме адліку, звязанай з другой ракетай.

7.10. Паскаральнік надаў радыеактыўнаму ядру скорасць  $v = 0,4$  с. У момант вылету з паскаральніка ядро выкінула ў напрамку свайго руху  $\beta$ -часцінку са скорасцю 0,75 с адносна паскаральніка. Знайсці скорасць часцінкі адносна ядра.

7.11. Які ўзрост касманаўта па гадзінніку Зямлі, калі ён у 30-гадовым узросце паляцеў на адлегласць да 20 светавых гадоў? Лічыць яго ўзрост па гадзінніку касманаўта 35 гадоў.

7.12. У колькі разоў рэлятывісцкая маса электрона, які рухаецца са скорасцю  $v = 0,999$  с, большая за яго масу спакою?

7.13. Рэлятывісцкая маса цела, якое рухаецца з адпаведнай скорасцю, узрасла ў параўнанні з яго масай спакою на 20 %. У колькі разоў пры гэтым зменшылася яго даўжыня?

7.14. Рэлятывісцкая маса рухомага пратона ў  $10^2$  разоў большая за яго масу спакою. Знайсці скорасць гэтага пратона.

7.15. Цела рухаецца са скорасцю 200,0 Мм/с. У колькі разоў узрасце шчыльнасць рухомага цела ў параўнанні са шчыльнасцю таго ж цела, калі яно знаходзіцца на Зямлі?

7.16. Электрон рухаецца са скорасцю 200,0 Мм/с. Вызначыць яго кінетычную энергію па класічнай і рэлятывісцкай формулах. Параўнаць рэзультаты.

7.17. Знайсці адносіну кінетычнай энергіі электрона да яго энергіі спакою, калі скорасць электрона 150,0 Мм/с. Які рэлятывісцкі імпульс электрона?

7.18. Поўная энергія мезона ў 8 разоў большая за яго энергію спакою. Якая скорасць мезона?

7.19. Якому змяненню масы адпавядае змяненне энергіі на 0,1 Дж?

7.20. Паказаць, што кінетычная энергія ў рэлятывісцкім выпадку  $E_k = m_0 c^2 (1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2} - 1)$  пры малых скорасцях руху пераходзіць у класічнае выражэнне для кінетычнай энергіі  $m_0 v^2 / 2$ .

## §8. ПРУГКІЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ ЦЕЛ

Адносная падоўжаная дэфармацыя

$$\varepsilon_l = \Delta l / l_0,$$

дзе  $\Delta l$  — прырашчэнне даўжыні пры расцяжэнні або сцісканні;  $l_0$  — даўжыня цела да дэфармацыі.

Адноснай дэфармацыяй кручэння называецца адносіна вугла закручвання да даўжыні стрыжня:

$$\varepsilon_\varphi = \varphi / l.$$

Адносная змена аб'ёму пры падоўжанай дэфармацыі

$$\Delta V / V = \varepsilon_l (1 - 2\mu),$$

дзе  $\mu$  — каэфіцыент Пуасона, роўны адносіне адноснай папярочнай дэфармацыі да падоўжанай:  $\mu = \varepsilon_d / \varepsilon_l$ .

Напружанне пры пругкай дэфармацыі

$$\sigma = dF / (dS),$$

дзе  $dF$  — сіла, якая дзейнічае на элементарна малы ўчастак дадзенага сячэння.

Залежнасць паміж адноснай падоўжанай дэфармацыяй і дэфармуючай сілай (закон Гука)

$$\varepsilon_l = \alpha \frac{F}{S} = \frac{1}{E} \frac{F}{S},$$

дзе  $\alpha$  — каэфіцыент пругкасці;  $E$  — модуль Юнга.

Разбураючая сіла

$$F_m = \sigma_m S,$$

дзе  $\sigma_m$  — разбураючае напружанне.

Адносная змена таўшчыні

$$\varepsilon_d = \Delta d / d = \beta \sigma,$$

дзе  $\beta$  — каэфіцыент папярочнага сціскання пры падоўжаным расцягванні.

Дэфармацыя зруху характарызуецца вуглом зруху, які вызначаецца па формуле

$$\psi = n \frac{F_\tau}{S} = n \rho_\tau = \frac{\sigma_\tau}{G},$$

дзе  $n$  — каэфіцыент зруху;  $F_\tau$  — сіла, якая выклікае зрух;  $\sigma_\tau$  — датычнае напружанне;  $G$  — модуль зруху.

Модуль Юнга  $E$ , модуль зруху  $G$  і каэфіцыент Пуасона  $\mu$  звязаны суадносінай

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

Вугал закручвання стрыжня

$$\varphi = 2Ml / (\pi GR^4),$$

дзе  $M$  — вярчальны момант;  $l$  — даўжыня стрыжня;  $R$  — радыус стрыжня.

Патэнцыяльная энергія пругка дэфармаванага стрыжня

$$E_p = \frac{E\varepsilon^2}{2} V,$$

дзе  $V$  — аб'ём стрыжня.

Шчыльнасць энергіі пругка дэфармаванага стрыжня

$$\omega = \frac{1}{2} E\varepsilon^2.$$

8.1. Груз, падвешаны на гумавым шнур даўжынёй 50 см, круцяць у гарызантальнай плоскасці з пастаяннай скорасцю так, што шнур апісвае канічную паверхню з вуглом пры вяршыні  $120^\circ$ . Вызначыць адноснае падаўжэнне шнура пры вярчэнні, калі ў выпадку нерухомага грузу расцяжэнне шнура 1 см. Расцяжэнне лічыць прапарцыянальным прыкладзенай сіле.

8.2. Якую нагрузку неабходна прыкласці да алюмініевага стрыжня, каб ён пры тэмпературы  $10^\circ\text{C}$  меў тую ж даўжыню, што і пры  $0^\circ\text{C}$ ? Плошча папярочнага сячэння стрыжня  $S = 1,5 \text{ см}^2$ . Модуль Юнга  $E = 70 \text{ ГПа}$ .

8.3. Гумавы шнур расцягнуты так, што яго даўжыня павялічылася ў 2 разы. Чаму роўны дыяметр расцягнутага шнура, калі да расцяжэння ён быў 1 см, а каэфіцыент Пуасона для гумы 0,5?

8.4. Вызначыць адноснае змяненне аб'ёму стальнага дроту дыяметрам 2 мм пры расцягванні яго сілай 1 кН. Каэфіцыент Пуасона  $\mu = 0,3$ .

8.5. Пры якой даўжыні падвешаны вертыкальна стальны дрот пачне рвацца пад дзеяннем уласнай вагі? Мяжа трываласці сталі  $p_m = 0,69 \text{ ГПа}$ .

8.6. Адносная змена аб'ёму пры падоўжанай дэфармацыі стрыжня роўная нулю. Вызначыць каэфіцыент Пуасона матэрыяла стрыжня.

8.7. Роўны дрот даўжынёй  $l$  падымаецца вертыкальна ўверх пад дзеяннем сілы, прыкладзенай да яе верхняга канца. Пры якім паскарэнні адбудзецца разрыў дроту?

8.8. Знайсці адноснае падаўжэнне дроту даўжынёй  $l$ , які падымаецца вертыкальна ўверх з паскарэннем  $a$  пад дзеяннем пастаяннай сілы, прыкладзенай да яго верхняга канца.

8.9. Вызначыць каэфіцыент Пуасона алюмініевага стрыжня, калі вядома, што пад дзеяннем некаторай сілы, напраўленай перпендыкулярна сячэнню стрыжня, адносная падоўжаная дэфармацыя  $\varepsilon_l = 0,001$ , а пры датычным напрамку такой жа сілы адносны зрух  $\psi = 0,0027$ .

8.10. Вызначыць таўшчыню ніткі, на якой падвешана рамка люстэркавага гальванометра, калі пад дзеяннем вярчальнага моманту  $M = 0,3 \text{ мН}\cdot\text{м}$  яна паварочваецца на вугал  $\varphi = 2^\circ$ . Даўжыня ніткі  $l = 10 \text{ см}$ . Модуль зруху матэрыялу ніткі  $G = 6,5 \text{ ГПа}$ .

8.11. Вызначыць адноснае падаўжэнне меднага стрыжня, калі пры яго



расцяжэнні выконваецца работа  $0,12$  Дж. Даўжыня стрыжня  $2$  м, плошча яго папярочнага сячэння  $1$  мм<sup>2</sup>.

8.12. Знайсці шчыльнасць пругкай энергіі расцягнутага сталёнага стрыжня, калі адноснае падаўжэнне  $0,001$ .

8.13. Два вагоны масамі  $m = 2,0 \cdot 10^4$  кг, якія рухаюцца насустрач адзін аднаму са скорасцямі  $v = 2$  м/с, сустракаюцца. Вызначыць сціск спружыны буфераў вагонаў, калі пад дзеяннем сілы  $F = 40$  кН спружына сціскаецца на  $x_0 = 1$  см. Лічыць, што сціск спружыны прапарцыянальны сіле.

8.14. Вызначыць сілу, з якой гімнаст масай  $m = 60$  кг дзейнічае на пругкую сетку пры скачку з вышыні  $h = 8,0$  м, калі пад дзеяннем сілы цяжару гімнаста сетка прагінаецца на  $x_0 = 16$  см.

8.15. Якую сілу неабходна развіць пры нацяжэнні лука на  $x = 0,20$  м, калі ўся выконваемая работа ідзе на перадачу страле кінетычнай энергіі, а найбольшая далёкасць палёту стралы  $s = 36$  м? Маса стралы  $m = 50$  г.

8.16. На якую вышыню падымецца камень масай  $m = 30$  г, кінуты вертыкальна ўверх з рагаткі, гумовы жгут якой сячэннем  $S = 0,20$  см<sup>2</sup> і даўжынёй  $l = 30$  см быў расцягнуты на  $\Delta l = 20$  см? Супраціўленне паветра не ўлічваць. Модуль Юнга для гумы  $E = 7,8$  МПа.

8.17. Самалёт садзіцца на палубу авіяноса, маючы скорасць  $100$  км/гадз. Зачапіўшыся за канат тармажэння, самалёт прабягае  $50$  м і спыняецца. Вызначыць перагрузкі, калі жорсткасць каната пры яго расцяжэнні не змяняецца.

8.18. Падстаўку, на якой ляжыць цела, падвешанае на спружыне, апускаюць з паскарэннем  $a < g$ . Да якой максімальнай даўжыні расцягнецца спружына, калі ў пачатковы момант яна была не расцягнута? Маса цела  $m$ , жорсткасць спружыны  $k$ .

## § 9. МЕХАНІЧНЫЯ ВАГАННІ І ХВАЛІ

Ураўненне затухаючых ваганняў і яго рашэнне:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0; \quad x = Ae^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi),$$

дзе  $\beta$  — каэфіцыент затухання,  $\omega$  — частата затухаючых ваганняў:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}.$$

Лагарыфмічны дэкрэмент затухання

$$\theta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \beta T.$$

Перыяд малых ваганняў матэматычнага маятніка

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

дзе  $l$  — даўжыня маятніка;  $g$  — паскарэнне сілы цяжару.

Перыяд ваганняў цела, падвешанага на спружыне,

$$T = 2\pi\sqrt{m/k},$$

дзе  $m$  — маса цела;  $k$  — жорсткасць спружыны.

Перыяд малых ваганняў фізічнага маятніка

$$T = 2\pi\sqrt{L/g},$$

дзе  $L = J/(md)$  — прыведзеная даўжыня фізічнага маятніка;  $J$  — момант інерцыі маятніка адносна восі хістанняў;  $m$  — маса маятніка;  $d$  — найкарацейшая адлегласць ад цэнтра мас да восі хістанняў.

Перыяд круцільных ваганняў

$$T = 2\pi\sqrt{J/k},$$

дзе  $k = M/\varphi$  ( $M$  — момант сілы;  $\varphi$  — вугал закручвання).

Перыяд затухаючых ваганняў

$$T = 2\pi / \sqrt{k/m - \beta^2},$$

дзе  $\beta = r/(2m)$  — каэфіцыент затухання.

Амплітуда вымушаных ваганняў пры дзеянні вымушаючай сілы  $F = F_0 \cos \omega t$

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}},$$

дзе  $f_0 = F_0/m$ ;  $\omega_0 = 2\pi\nu_0 = (k/m)^{1/2}$ ;  $\omega = 2\pi\nu$ ;  $\nu$  і  $\nu_0$  — частоты ўласных ваганняў пры адсутнасці затухання і вымушаючай сілы адпаведна.

Перыяд ваганняў аднароднай струны

$$T = 2l\sqrt{m/F},$$

дзе  $l$  — даўжыня струны;  $m$  — маса адзінкі даўжыні струны;  $F$  — сіла нацяжэння струны.

Поўная энергія матэрыяльнага пункта масай  $m$ , які робіць гарманічныя ваганні,

$$E = E_k + E_p = m\omega^2 A^2 / 2.$$

Скорасць распаўсюджвання хвалі

$$v = \lambda\nu,$$

дзе  $\lambda$  — даўжыня хвалі.

Скорасць распаўсюджвання падоўжных хваляў у тонкіх стрыжнях

$$v = \sqrt{E/\rho},$$

дзе  $E$  — модуль Юнга асяроддзя;  $\rho$  — яго шчыльнасць.

Скорасць распаўсюджвання папярочных хваляў

$$v = \sqrt{G/\varphi},$$

дзе  $G$  — модуль зруху.

Скорасць падоўжных хваляў у неабмежаваным пругкім асяроддзі:

$$v = \sqrt{k/\rho},$$

дзе  $k$  — модуль усебаковага сціскання.

Узровень гучнасці гуку, дБ:

$$L_N = 10 \lg I/I_0,$$

дзе  $I$  — інтэнсіўнасць гуку,  $I_0$  — інтэнсіўнасць на парозе чутнасці.

Частата гуку, які успрымаецца назіральнікам, згодна прынцыпу Доплера, вызначаецца па формуле

$$\nu' = \frac{c \pm v}{c \mp u} \nu,$$

дзе  $\nu$  — частата гуку, пасылаемага крыніцай;  $c$  — скорасць распаўсюджвання гуку;  $v$  — скорасць руху назіральніка;  $u$  — скорасць крыніцы гуку. Верхнія знакі бяруцца пры збліжэнні крыніцы і назіральніка, ніжнія — пры іх аддаленні.

## Ваганні

9.1. Цела масай 5 г робіць ваганне, якое апісваецца ўраўненнем  $x = 0,1 \sin[\pi/2(t + 1/3)]$ . Знайсці кінетычную і патэнцыяльную энергіі цела праз 20 с ад моманту часу  $t = 0$ . Чаму роўная поўная энергія цела?

9.2. Вызначыць масу цела, якое робіць гарманічныя ваганні з амплітудай 0,10 м, частатой 2,0 Гц і пачатковай фазай  $30^\circ$ , калі поўная энергія ваганняў 7,7 мДж. Праз колькі секунд ад пачатку адліку часу кінетычная энергія будзе роўная патэнцыяльнай?

9.3. Вызначыць амплітуду гарманічных ваганняў матэрыяльнага пункта, калі яго поўная вагальная энергія 40 мДж, а сіла, якая дзейнічае на яго пры зрушэнні, роўным палове амплітуды, складае 2,0 Н.

9.4. У колькі разоў паменшыцца поўная энергія ваганняў секунднага маятніка за 5 мін, калі лагарыфмічны дэкрэмент затухання 0,031?

9.5. Амплітуда ваганняў камертона за 15 с зменшылася ў 100 разоў. Знайсці каэфіцыент затухання ваганняў.

9.6. Пабудаваць графік затухаючага гарманічнага вагання, частата якога 10 Гц, пачатковая амплітуда 6 см і лагарыфмічны дэкрэмент затухання 0,01.

9.7. Як зменіцца ход маятнікавага гадзінніка, калі падняць яго на вышыню 20 км над паверхняй Зямлі?

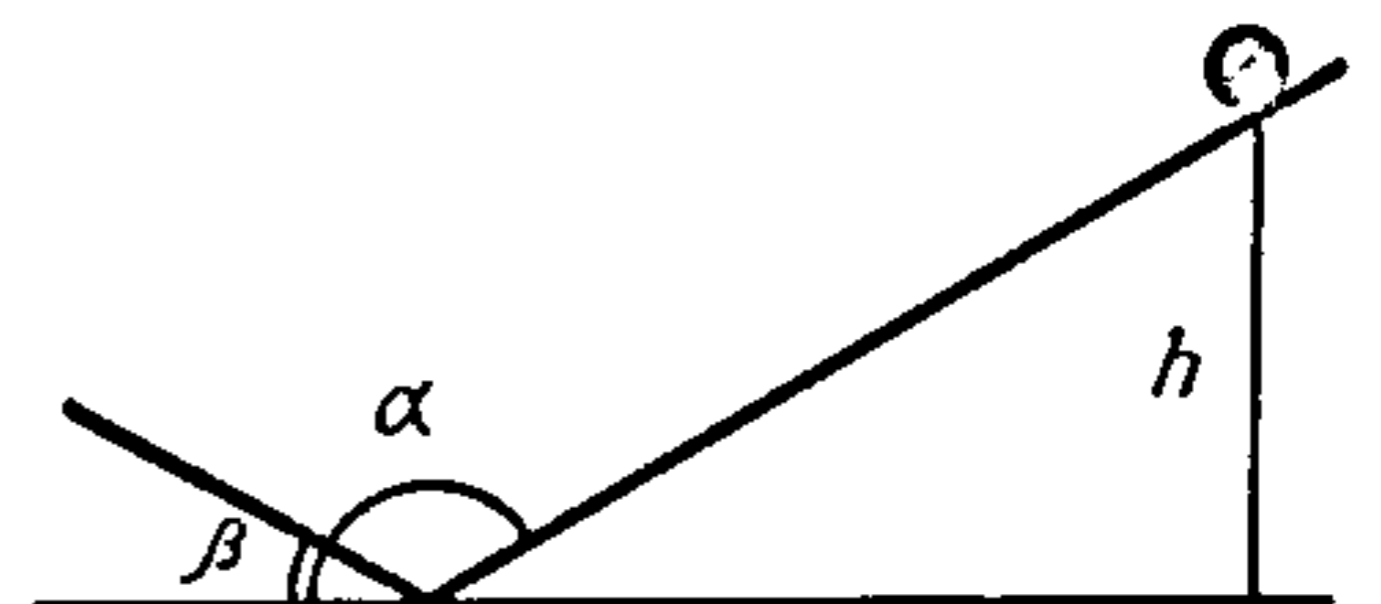
9.8. Матэматычны маятнік падвешаны да столі вагона электрацягніка. У колькі разоў зменіцца яго перыяд ваганняў, калі вагону надаць гарызантальнае паскарэнне  $a$ ?

9.9. Шарык масай  $m = 200$  г, падвешаны на спружыне, вагаецца з частатой  $\nu = 5,0$  Гц. Вызначыць каэфіцыент пругкасці спружыны.

9.10. Вызначыць перыяд ваганняў груза на спружынных вагах, калі ў стане раўнавагі ён зрушвае стрэлку вагаў на  $\Delta x = 2,0$  см ад нулявога дзялення, якое адпавядае ненагружанай спружыне.

9.11. Вызначыць мінімальную частату ваганняў нахільнай плоскасці (у падоўжным напрамку), пры якой цела, што знаходзіцца на ёй, пачне слізгаць. Вугал нахілу плоскасці  $\alpha = 10^\circ$ , амплітуда ваганняў  $A = 10$  см, каэфіцыент трэння цела аб нахільную плоскасць  $\mu = 0,4$ .

9.12. З якой частатой будзе рабіць ваганні маленькі цяжкі шарык, змешчаны паміж дзвю-



Рыс.9.1



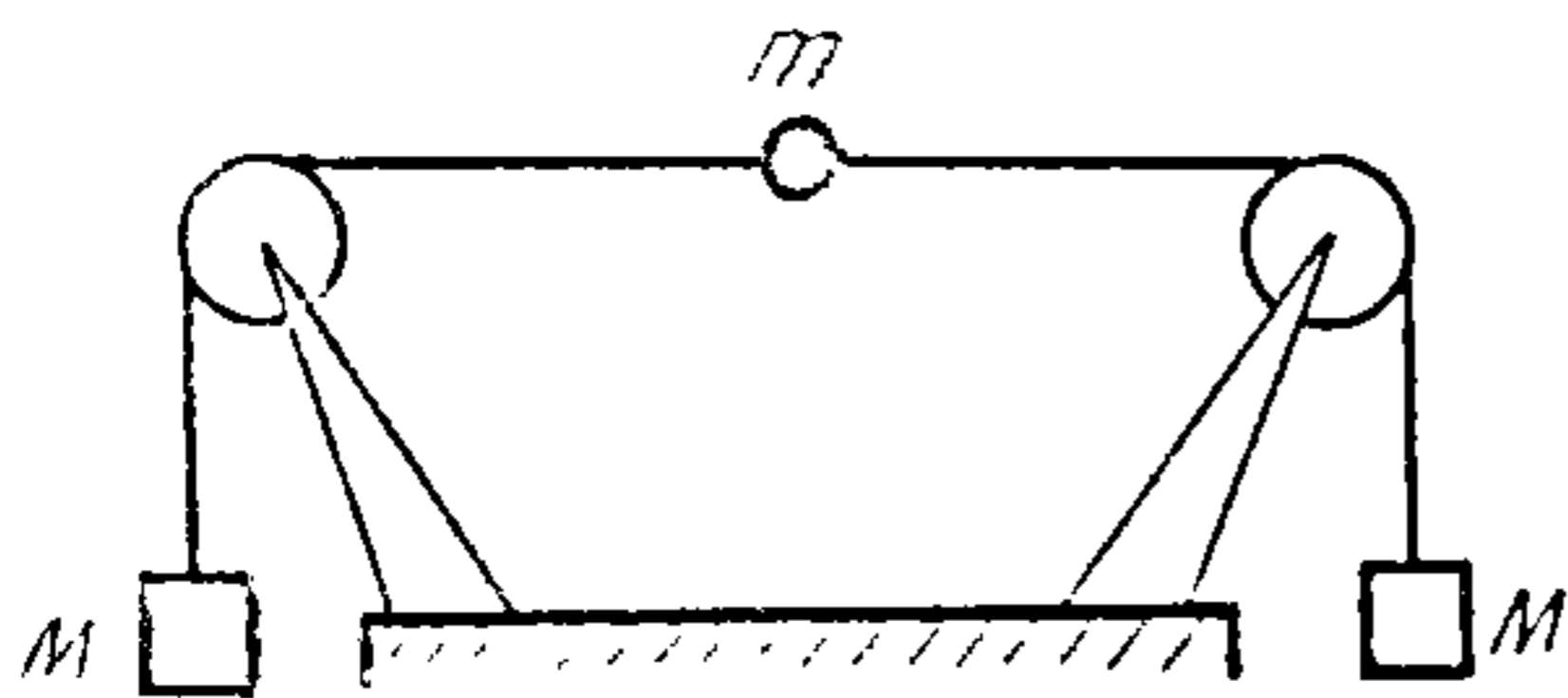


Рис. 9.2

ма плоскасцямі, што перасякаюцца, утвараючы вугал  $\alpha = 170^\circ$ , калі адна з іх утварае вугал  $\beta = 5^\circ$  з гарызонтам, а шарык першапачаткова быў падняты на вышыню  $h = 10$  см (рыс. 9.1)? Трэне і ўдар шарыка аб плоскасць не ўлічваць.

9.13. Шклянка масай  $m_1 = 20$  г і плошчай папярочнага сячэння  $s = 5$  см<sup>2</sup> утрымлівае ртуць масай  $m_2 = 80$  г і плавае на паверхні вады. Пад дзеяннем вертыкальнай сілы шклянка выводзіцца з стану раўнавагі і апускаецца. Вызначыць перыяд ваганняў сістэмы.

9.14. Знайсці частату ваганняў груза масай  $m = 0,20$  кг, падвешанага на спружыне і змешчанага ў масле, калі каэфіцыент трэння ў масле  $r = 0,50$  кг/с, а жорсткасць спружыны  $k = 50$  Н/м.

9.15. Стрыжань даўжынёй  $l = 50$  см робіць ваганні вакол гарызантальнай восі, што праходзіць праз пункт, які знаходзіцца на адлегласці  $d = 1,25$  см ад канца стрыжня. Вызначыць частату ваганняў стрыжня.

9.16. На канцах стрыжня, маса якога  $m = 60$  г і даўжыня  $l = 49$  см, умацаваны два шарыкі масамі  $m_1 = 70$  г і  $m_2 = 90$  г, а стрыжань падвешаны так, што можа рабіць ваганні вакол гарызантальнай восі, якая праходзіць праз яго сярэдзіну. Вызначыць перыяд малых ваганняў стрыжня.

9.17. Стрыжань падвешаны ў ліфце за адзін канец так, што можа рабіць ваганні. Даўжыня стрыжня 50 см. Вызначыць перыяд ваганняў стрыжня, калі ліфт рухаецца з паскарэннем  $1,2$  м/с<sup>2</sup>, накіраваным уверх.

9.18. Аднародны дыск радыусам  $R = 0,10$  м робіць ваганні вакол гарызантальнай восі, што праходзіць праз пункт, які знаходзіцца на адлегласці  $R/2$  ад цэнтра дыска, і перпендыкулярная плоскасці дыска. Вызначыць частату ваганняў дыска.

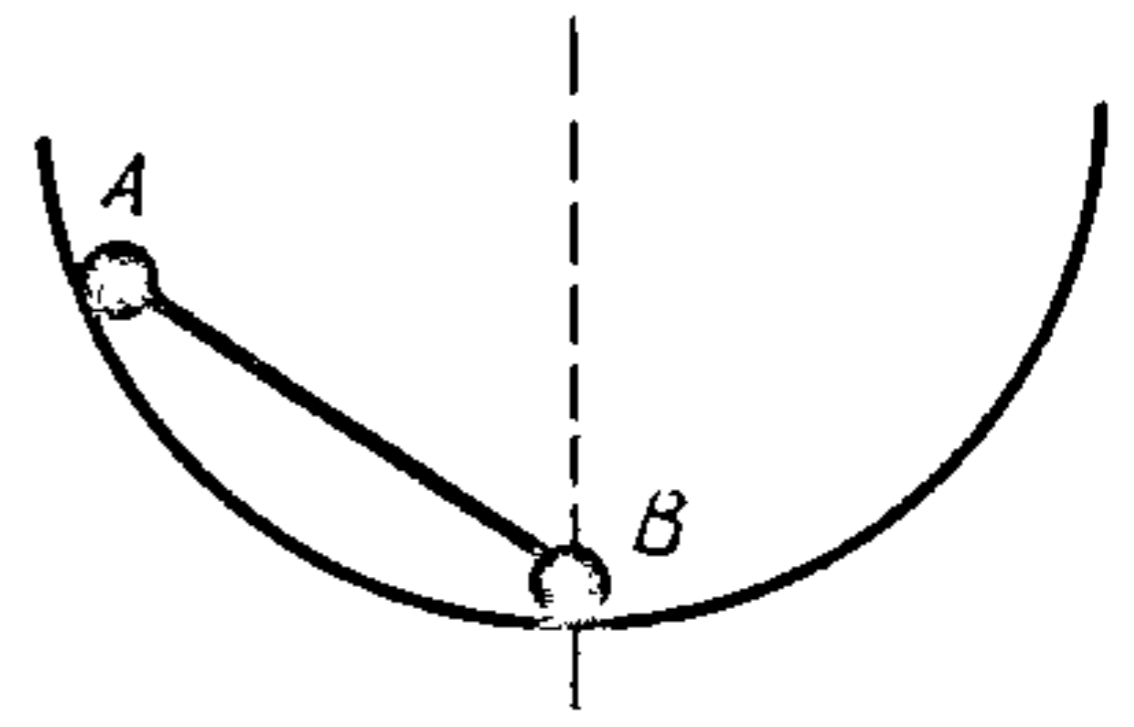
9.19. Струна, на канцах якой замацаваны грузы масай  $M = 0,40$  кг кожны, перакінута цераз два нерухомыя блокі, размешчаныя на адлегласці  $1,0$  м (рыс. 9.2.). Да сярэдзіны струны прымацаваны маленькі грузік масай  $m = 9,8$  г. Вызначыць перыяд малых папярочных ваганняў грузіка. Масу струны і яе пачатковае нацяжэнне пад дзеяннем грузіка  $m$  не ўлічваць.

9.20. Вызначыць перыяд круцільных ваганняў жалезнага шара радыусам  $R = 0,1$  м, падвешанага на стальным дроце радыусам  $r = 1$  мм і даўжынёй  $l = 1$  м. Модуль зруху для сталі прыняць роўным  $G = 80$  ГПа.

9.21. Вызначыць амплітуду вымушаных ваганняў груза масай  $0,2$  кг, падвешанага на спружыне жорсткасцю  $20$  Н/м, калі дзейнічае вымушальная сіла з амплітудай  $2$  Н і частатой, ў два разы большай за уласную частату ваганняў груза, а каэфіцыент затухання  $0,5$  с<sup>-1</sup>.

9.22. Шар-зонд, які мае нерасцяжную абалонку, падняўся на максімальную вышыню і робіць малыя ваганні вакол раўнаважнага ўзроўню.

Знайсі перыяд гэтых ваганняў, лічачы, што на такой вышыні шчыльнасць паветра змяншаецца з вышыняй раўнамерна на  $\delta = 1,2 \cdot 10^{-2} \rho$  праз кожны  $h = 100$  м. Тэрэнне шара аб паветра не ўлічваць.



Рыс.9.3

9.23. Два шарыкі масамі  $m_1$  і  $m_2$ , замацаваныя паміж сабой спружынай, жорсткасць якой  $k$ , ляжаць на гарызантальнай плоскасці. Спружына расцягваецца і адпускаецца. Вызначыць перыяд узнікшых ваганняў шарыкаў. Тэрэнне не ўлічваць.

9.24. У якім выпадку цела, што знаходзіцца ў пункце  $A$  (рыс. 9.3), дасягне пункта  $B$  хутчэй: калі яно будзе слізгаць па паверхні сферы або ўздоўж прамой  $AB$ ? Лічыць, што адлегласць  $AB$  значна меншая за радыус сферы, а тэрэнне ў абодвух выпадках не ўлічваць. Пачатковая скорасць цела роўная нулю.

9.25. Як вызначыць невядомую масу цела  $m_1$ , маючы секундамер, спружыну і другое цела вядомай масы  $m_2$ ?

### Хвалевы рух. Акустыка

9.26. Знайсці скорасць распаўсюджвання гукавых ваганняў у паветры, даўжыня хвалі якіх  $1,0$  м, а частата ваганняў  $340$  кГц. Чаму роўная максімальная скорасць зрушэння часціц паветра, калі амплітуда ваганняў  $0,2$  мм?

9.27. На якой адлегласці ад крыніцы ваганняў, здзяйсняемых па закону сінуса, у момант часу  $t = T/2$  зрушэнне пункта ад стану раўнавагі роўнае палове амплітуды? Скорасць распаўсюджвання ваганняў  $340$  м/с. Перыяд ваганняў  $10^{-3}$  с.

9.28. Вызначыць скорасць распаўсюджвання хваляў у возеры, калі перыяд качання лодкі, што знаходзіцца на паверхні вады,  $4,0$  с, а адлегласць паміж бліжэйшымі грабянямі хвалі  $6,0$  м.

9.29. У колькі разоў зменіцца даўжыня ультрагукавой хвалі пры пераходзе яе з сталі ў медзь, калі скорасці распаўсюджвання ультрагуку ў медзі і сталі адпаведна  $3600$  і  $5500$  м/с?

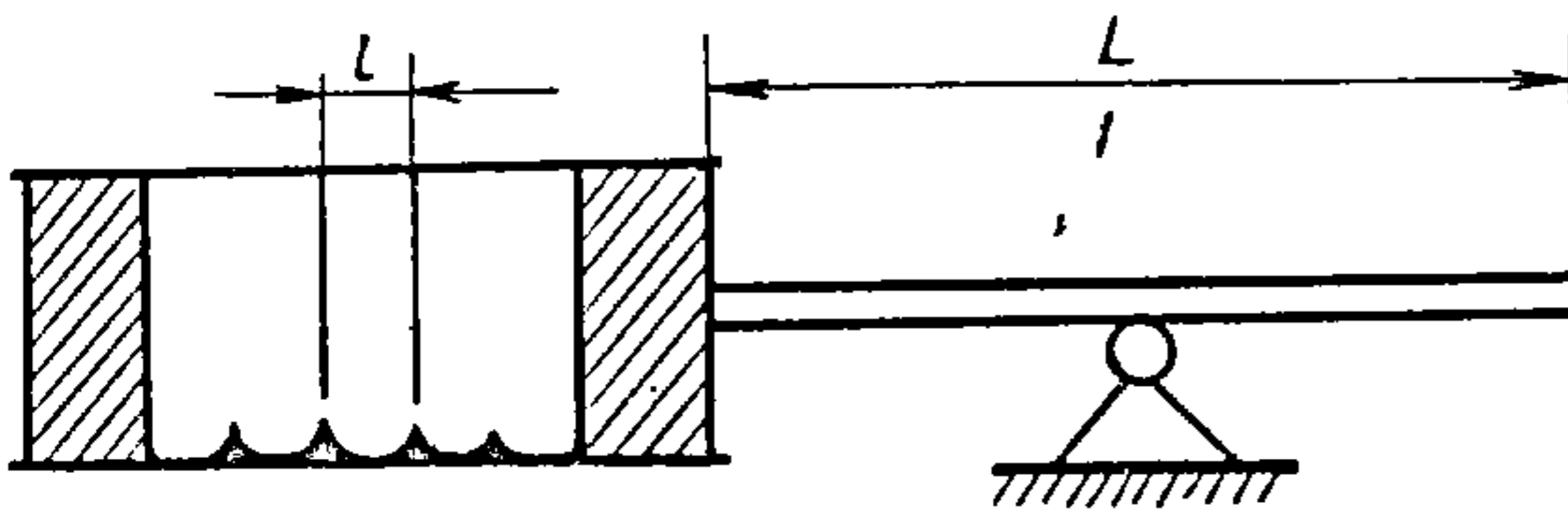
9.30. Знайсці скорасць распаўсюджвання ультрагуку ў жалезе, калі модуль Юнга для жалеза  $20$  ГПа, а шчыльнасць  $7800$  кг/м<sup>3</sup>.

9.31. Вызначыць скорасць распаўсюджвання папярочных гукавых хваляў у медзі. Модуль зруху для медзі  $12,0$  ГПа, шчыльнасць медзі  $8900$  кг/м<sup>3</sup>.

9.32. Вызначыць скорасць гуку ў вадзе, калі вядома, што модуль усебаковага сціску вады  $1698$  ГПа.

9.33. Чаму роўны каэфіцыент усебаковага сціску вады, калі пасланы з карабля ультрагукавы сігнал, адбіўшыся на глыбіні  $h = 1,5$  км, вярнуўся праз  $t = 2,1$  с?





Рыс. 9.4

9.34. Вызначыць нацяжэнне стальной струны даўжынёй 0,50 м і дыяметрам 0,20 мм, калі вядома, што яна настроена ва ўнісон з камертонам, частата якога 430 Гц.

9.35. Знайсці скорасць распаўсюджвання папярочных гукавых хваляў у стальной струне дыяметрам 1,0 мм, нацягнутай з сілай 100 Н.

9.36. Чаму роўная скорасць распаўсюджвання гукавой хвалі ў медным дротце даўжынёй 10 м, які нацягнуты сілай 200 Н? Маса дроту 50 г.

9.37. Колькі біццяў у секунду ўзнікае пры ваганнях камертону і размешчанай каля яго нацягнутай струны, калі частата ваганняў камертону 430 Гц, нацяжэнне струны 100 Н, яе даўжыня 0,5 м, а дыяметр 0,3 мм?

9.38. У прыборы Кундта пры падоўжаным націранні жалезнага стрыжня даўжынёй  $L = 0,50$  м, які замацаваны ў сярэдзіне, парашок, насыпаны ў шкляную трубку, утварыў слой неаднолькавай шчыльнасці, прычым адлегласць паміж двума максімумамі шчыльнасці аказалася роўнай  $l = 3,0$  см (рыс. 9.4). Вызначыць скорасць гуку ў жалезе, калі ў паветры яна роўная 340 м/с.

9.39. Вызначыць частату асноўнага тону адкрытай трубы даўжынёй 1,0 м, якая запоўнена паветрам.

9.40. Чаму роўная частата асноўнага тону закрытай з аднаго канца трубы даўжынёй 1,5 м, калі яна запоўнена вадой? Скорасць распаўсюджвання гуку ў вадзе прыняць 1,5 км/с.

9.41. Узровень гучнасці шуму самалёта на адлегласці 5 м роўны 120 дБ, а ціхай размовы на той жа адлегласці — 40 дБ. Вызначыць, як адносяцца інтэнсіўнасці гэтых гукаў, і знайсці абсалютныя значэнні гэтых інтэнсіўнасцей.

9.42. На колькі дэцыбелаў адрозніваюцца гукі, што адпавядаюць парогу чутнасці ( $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>) і парогу болевых адчуванняў ( $I = 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>)?

9.43. Падводная лодка, што рухаецца са скорасцю  $v = 10$  м/с, пасылае ультрагукавы сігнал частатой  $\nu = 30$  кГц, які, адбіўшыся ад перашкоды, вяртаецца назад. Вызначыць розніцу паміж частотамі пасылаемага і прынятага сігналаў.

9.44. Два катэры рухаюцца насустрач адзін аднаму з аднолькавай скорасцю  $v = 10,0$  м/с. З першага катэра пасылаецца ультрагукавы сігнал частатой  $\nu = 50,0$  кГц, які адбіваецца ад другога катэра і прымаецца на першым. Вызначыць частату прынятага сігналаў.

9.45. Два электрацягнікі ідуць насустрач адзін аднаму са скарасцямі  $v_1 = 30,0$  м/с і  $v_2 = 10,0$  м/с. Першы цягнік дае свісток, вышыня тону якога адпавядае частаце  $\nu = 500$  Гц. Вызначыць частату, успрымаемую пасажы-



рам другога электрацягніка перад сустрэчай цягнікоў і пасля яе. Чаму былі б роўныя адпаведныя частоты, калі б пасажыр знаходзіўся на першым электрацягніку, а сігнал даваў другі?

9.46. Падводная лодка пры вертыкальным апусканні выпраменьвае кароткія гукавыя імпульсы сігналу гідралакатара працягласцю  $\tau_0$  у напрамку дна. Працягласць адбітых сігналаў, вымераная гідраакустыкам на лодцы, роўная  $\tau$ . Чаму роўная скорасць апускання лодкі? Скорасць гука ў вадзе  $v$ , дно гарызантальнае.

## § 10. ЗАКОН СУСВЕТНАГА ПРЫЦЯГНЕННЯ

Два матэрыяльныя пункты масамі  $m_1$  і  $m_2$ , размешчаныя на адлегласці  $r$ , узаемадзейнічаюць з сілай

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

дзе  $G$  — гравітацыйная пастаянная.

Пры руху планет вакол Сонца і спадарожнікаў вакол планет (у тым ліку і штучных) кубы большых паўвосей эліпсаў прапарцыянальныя квадратам перыядаў абарачэння планет (трэці закон Кеплера):

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2}{T_2^2}.$$

10.1. Першы штучны спадарожнік Зямлі меў перыяд абарачэння 1 гадз. 36 мін. Лічачы арбіту спадарожніка кругавой, а рух раўнамерным, вызначыць вышыню спадарожніка над паверхняй Зямлі.

10.2. На якую вышыню неабходна запусціць штучны спадарожнік Зямлі, каб з Зямлі ён здаваўся нерухомым, а яго арбіта была кругавой і ляжала ў плоскасці экватара? радыус Зямлі  $R_3 = 6,37$  Мм, а перыяд сутачнага вярчэння  $T = 24$  гадз?

10.3. Якую скорасць неабходна надаць целу, каб яно магло аддаліцца з паверхні Месяца ў бязмежнасць? Маса Месяца  $M_M = 7,3 \cdot 10^{22}$  кг, радыус Месяца  $R_M = 1,74$  Мм.

10.4. Вызначыць скорасць руху Месяца вакол Зямлі, калі лічыць, што Месяц рухаецца па кругавой арбіце. Прыняць масу Зямлі роўнай  $M = 5,96 \times 10^{24}$  кг, а адлегласць паміж Месяцам і Зямлёй  $R = 384,4$  Мм.

10.5. На якой адлегласці ад цэнтра Зямлі касмічная ракета, якая рухаецца да Месяца, будзе прыцягвацца Зямлёй і Месяцам з аднолькавай сілай? Маса Месяца ў 81 раз меншая за масу Зямлі, а адлегласць паміж іх цэнтрамі ў 60 разоў большая за радыус Зямлі.

10.6. З якой скорасцю рухаецца вакол Сонца Зямля, калі адлегласць паміж імі каля 150 Гм, а маса Сонца  $1,97 \cdot 10^{30}$  кг?

10.7. Вызначыць сярэднюю шчыльнасць Зямлі, калі вядома, што яе радыус 6,37 Мм, а паскарэнне свабоднага падзення  $9,8$  м/с<sup>2</sup>.

10.8. Вызначыць масу Зямлі, калі вядома, што штучны спадарожнік, запушчаны на вышыню 1 Мм, мае перыяд абарачэння 106 мін.

10.9. Вызначыць сярэднюю скорасць вярчэння Месяца па арбіце, лічачы сярэднюю адлегласць яго ад Зямлі 384 Мм, а масу Зямлі  $5,96 \cdot 10^{24}$  кг.

10.10. Знайсці другую касмічную скорасць, г.зн. найменшую скорасць, пры якой ракета можа аддаліцца ад Зямлі і выйсці за межы яе поля прыцягнення.

10.11. На колькі зменшыцца маса цела на вяршыні Эльбруса ( $h = 6$  км) у параўнанні з яе значэннем на ўзроўні мора?

10.12. На якой вышыні паскарэнне сілы цяжару ўдвая меншае за яго значэнне на паверхні Зямлі?

10.13. Якое паскарэнне атрымлівае Зямля пад дзеяннем сілы прыцягнення яе Сонцам?

10.14. Касмічная ракета, стаўшая штучнай планетай, рухаецца вакол Сонца з перыядам абарачэння 450 сут. Знайсці сярэднюю аддаленасць ад Сонца штучнай планеты, калі вядома, што сярэдняя адлегласць ад Сонца да Зямлі 149,5 Гм, а перыяд яе абарачэння 365 сут. 6 гадз. 9 мін 10 с. Лічыць арбіты планет кругавымі.

10.15. Чаму роўная лінейная скорасць руху Зямлі вакол Сонца ў перыгеліі, калі найменшая і найбольшая адлегласці ад Зямлі да Сонца адпаведна  $r_1 = 147$  Гм і  $r_2 = 152$  Гм, а сярэдняя скорасць руху Зямлі па арбіце  $\langle v \rangle = 29,8$  м/с?

10.16. Вызначыць работу, якую патрэбна выканаць, каб цела масай  $5 \times 10^3$  кг, якое знаходзіцца на паверхні Зямлі, адправіць у міжпланетную прастору. Супраціўленне паветра не ўлічваць.

10.17. Вядома, што па меры павелічэння радыуса арбіты скорасць штучнага спадарожніка Зямлі змяншаецца. Ці азначае гэта, што пры запуску спадарожніка на арбіты большага радыуса рухавікі ракеты павінны выконваць меншую работу? Чаму?

10.18. Знайсці ціск у цэнтры вадкай планеты, радыус якой  $R$ , калі вадкасць, што ўтварае яе, несціскаемая і мае шчыльнасць  $\rho$ .

## Раздзел II

### МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА І ТЭРМАДЫНАМІКА

#### §11. АСНОВЫ МАЛЕКУЛЯРНА-КІНЕТЫЧНАЙ ТЭОРЫІ ГАЗАЎ

Асноўнае ўраўненне кінетычнай тэорыі газаў (ураўненне Клаўзіўса)

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_0 \rangle ,$$

дзе  $p$  — ціск газу;  $n$  — канцэнтрацыя малекул;  $\langle E_0 \rangle$  — сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекулы.

Сярэдняя энергія малекулы

$$\langle E \rangle = \frac{i}{2} kT ,$$

дзе  $i$  — сума паступальных, вярчальных і падвоянага ліку вагальных ступеняў свабоды. Для малекулы з жорсткай сувяззю паміж атамамі  $i$  супадае з лікам яе ступеняў свабоды\*;  $k$  — пастаянная Больцмана;  $T$  — тэрмадынамічная тэмпература газу.

Залежнасць ціску газу ад канцэнтрацыі малекул і тэмпературы

$$p = nkT .$$

Ураўненне стану ідэальнага газу (ураўненне Мендзялеева—Клапейрона)

$$pV = \frac{m}{M} RT ,$$

дзе  $V$ ,  $m$ ,  $M$  — аб'ём, маса і малярная маса газу адпаведна;  $R$  — малярная газавая пастаянная.

Ціск сумесі газаў (закон Дальтона)

$$p = \sum_{i=1}^z p_i ,$$

дзе  $p_i$  — парцыяльны ціск  $i$ -га кампаненту сумесі;  $z$  — лік кампанентаў.

Сярэдняя квадратычная, сярэдняя арыфметычная і найбольш імаверная скорасці малекул:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} ; \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} ; \quad v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} .$$

Размеркаванне Максвела

$$dN(v) = N \left( \frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-m_0 v^2 / (2kT)} 4\pi v^2 dv ,$$

дзе  $dN(v)$  — лік малекул, скорасці якіх знаходзяцца ў інтэрвале ад  $v$  да  $v + dv$ ;  $N$  — агульны лік малекул;  $m_0$  — маса малекулы.

Бараметрычная формула:

$$p = p_0 e^{-Mg(h-h_0) / (RT)} ,$$

\* Ва ўсіх задачах § 11—14, калі гэта не будзе спецыяльна агаворана, газ лічыць ідэальным, малекулы газу — жорсткімі, аб'ёмнымі.



дзе  $p$  і  $p_0$  — ціск газу на вышыні  $h$  і  $h_0$  адпаведна.

Размеркаванне Больцмана:

$$n = n_0 e^{-mg(h-h_0)/(kT)},$$

дзе  $n_0$  — канцэнтрацыя часцінак на вышыні  $h_0$ .

### Асноўнае ўраўненне кінетычнай тэорыі газаў

11.1. Мікраскапічная пылінка вугляроду мае масу 0,1 нг. Вызначыць, з колькіх атамаў яна складаецца.

11.2. Радонавыя ванны, якія ўжываюцца для лячэння, змяшчаюць  $1,8 \times 10^6$  атамаў радону ў вадзе аб'ёмам  $1,0 \text{ дм}^3$ . На колькі малекул вады прыпадае адзін атам радону ў лячэбнай ванне?

11.3. Колькі часцінак (атамаў і малекул) знаходзіцца ў азоце масай 1,0 г, калі ступень дысацыяцыі азоту 7,0 %?

11.4. Колькі атамаў ртуці змяшчаецца ў паветры аб'ёмам  $1,0 \text{ м}^3$  у памяшканні, атручаным ртуцю, пры тэмпературы  $20^\circ \text{С}$ , калі ціск насычанай пары ртуці пры гэтай тэмпературы  $133 \text{ мПа}$ ?

11.5. Знайдзі даўжыню рабра куба, які змяшчае  $1,0 \cdot 10^6$  малекул ідэальнага газу пры нармальных умовах.

11.6. Газ награвецца ў адкрытай пасудзіне пры нармальным атмасферным ціску ад  $27^\circ \text{С}$  да  $372^\circ \text{С}$ . Якое прырашчэнне атрымае пры гэтым лік малекул у адзінцы аб'ёму газу?

11.7. У пасудзіне аб'ёмам  $1 \text{ дм}^3$  змяшчаецца некаторы газ пры тэмпературы  $17^\circ \text{С}$ . Знайсці прырашчэнне ціску газу, калі з прычыны ўцечкі газу з яго выйдзе  $10^{21}$  малекул.

11.8. У пасудзіне аб'ёмам  $3,0 \text{ дм}^3$  знаходзіцца гелій масай 4,0 мг, азот масай 70 мг і  $5,0 \cdot 10^{21}$  малекул вадароду. Які ціск сумесі, калі тэмпература яе  $27^\circ \text{С}$ ?

11.9. У закрытай кубічнай пасудзіне, рабро якой  $l = 1,0 \text{ см}$ , знаходзіцца  $N$  малекул паветра. Сценкі кубіка такія, што малекулы паветра, трапіўшы на сценку, застаюцца на ёй на працягу  $\tau = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ . Знайсці лік малекул паветра, якія знаходзяцца на сценах, калі тэмпература пасудзіны  $300 \text{ К}$ .

11.10. Для далёкай касмічнай сувязі выкарыстоўваецца спадарожнік аб'ёмам  $100 \text{ м}^3$ , напоўнены паветрам пры нармальных умовах. Метэарыт прабівае ў яго корпусе дзірку плошчай  $S = 1,0 \text{ см}^2$ . Знайсці час, праз які ціск у сярэдзіне спадарожніка зменіцца на 1,0 %. Тэмпературу газу лічыць нязменнай.

11.11. У герметычна закрытай пасудзіне змяшалі пароўну кісларод і гелій, а потым у сценцы пасудзіны зрабілі адтуліну. Знайсці састаў малекулярнага пучка, які выходзіць з яе.

11.12. Вызначыць сярэдняю кінетычную энергію вярчальнага руху малекул вадароду, якія змяшчаюцца ў  $1,0$  моль пры  $18^\circ \text{С}$ .

11.13. Знайсці сярэдняю энергію малекул, якія змяшчаюцца ў азоце

масай 7,0 г пры тэмпературы 16 ° С. Якая частка гэтай энергіі прыпадае на долю паступальнага руху і якая на долю вярчальнага? Вагальныя ступені свабоды малекул азоту не ўзбуджаюцца.

11.14. У пасудзіне аб'ёмам 2,0 дм<sup>3</sup> знаходзіцца газ пад ціскам 0,50 МПа. Чаму роўная сярэдняя кінетычная энергія паступальнага руху малекул газу?

11.15. Кісларод масай 12 г знаходзіцца пры тэмпературы 700 ° С, пры гэтым 40 % малекул дысацыіравана на атамы. Чаму роўная сярэдняя энергія цэплага руху часцінак? Вагальныя ступені свабоды малекул кіслароду не ўзбуджаюцца.

11.16. У газе, які складаецца з чатырохатамных (аб'ёмных) малекул, пры тэмпературы  $1,00 \cdot 10^3$  К узбуджаны ўсе ступені свабоды (уключаючы вагальныя). Знайсці сярэднюю энергію малекулы такога газу. Якая частка гэтай энергіі прыпадае на долю паступальнага руху?

11.17. Да якой максімальнай тэмпературы можа нагрывацца з прычыны трэння аб паветра паверхня самалёта, які ляціць са скорасцю, блізкай да скорасці гуку? Лічыць, што паветра складаецца з жорсткіх малекул азоту. Тэмпературу навакольнага паветра прыняць роўнай  $-10$  ° С.

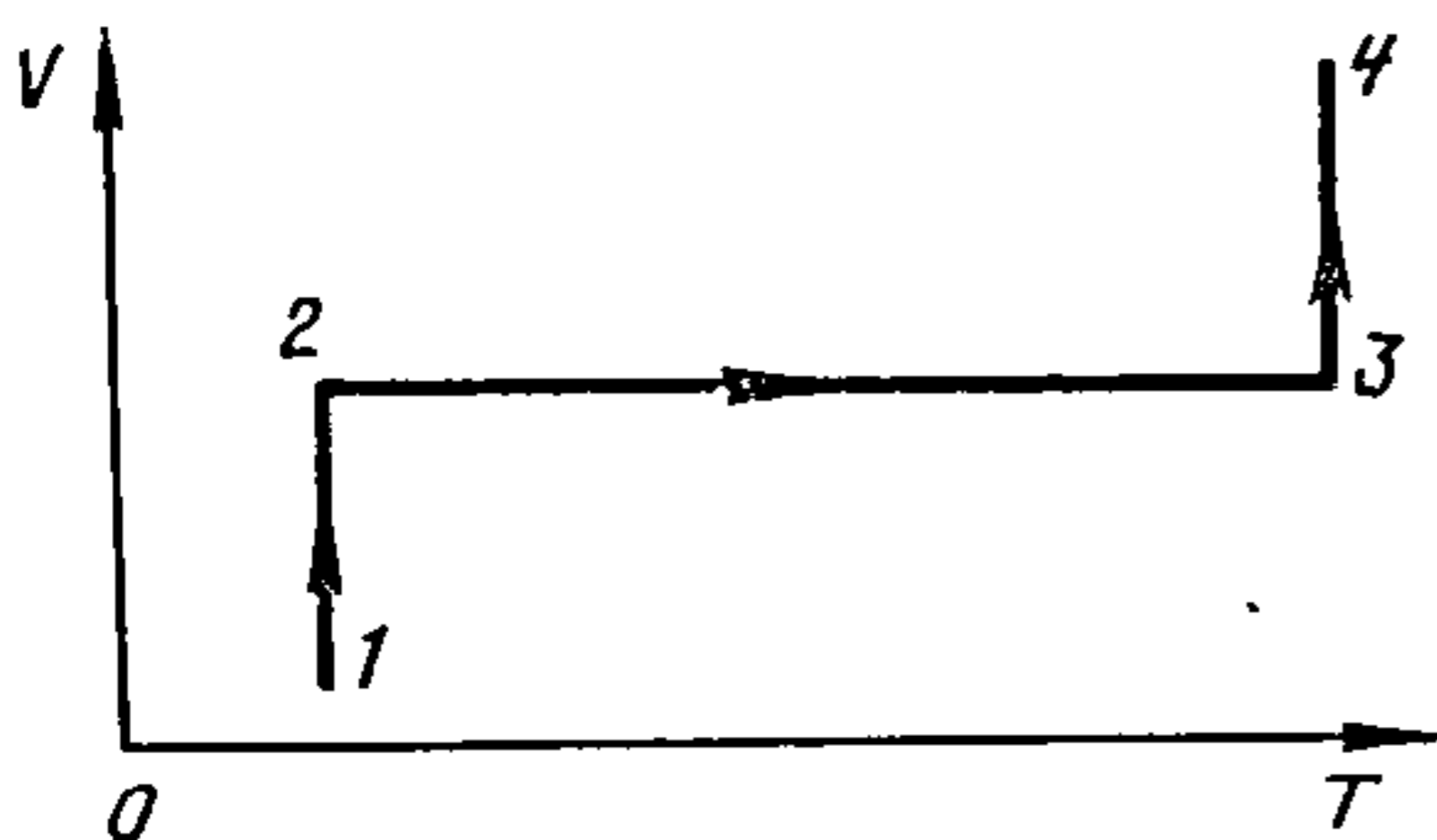
### Газавыя законы

11.18. Некаторы ідэальны газ спачатку ізабарна расшыраецца, а потым ізатэрмічна сціскаецца. Начарціць графікі гэтых працэсаў у каардынатах  $p, T$  і  $V, T$ .

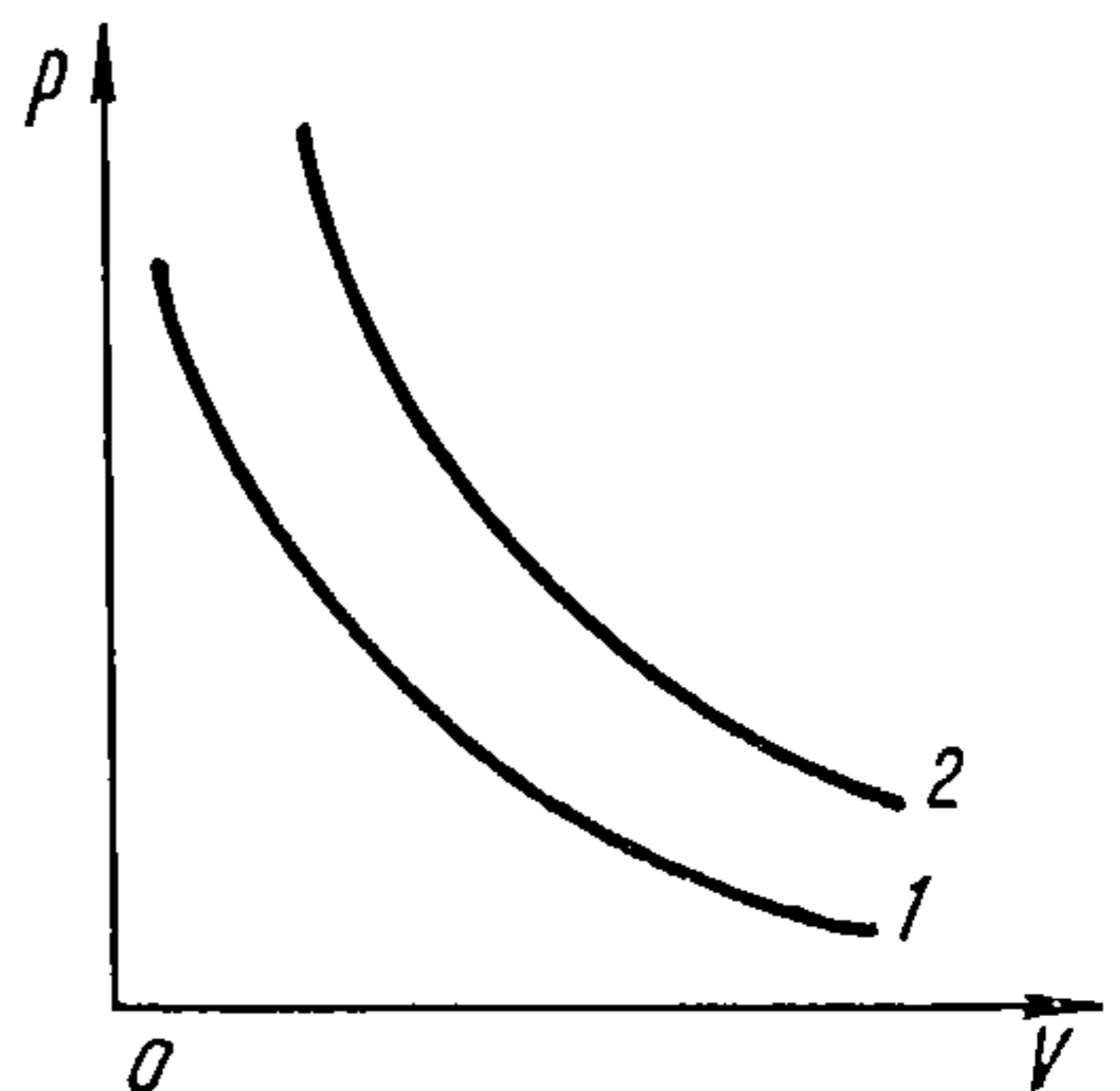
11.19. Паказаць графічна залежнасць шчыльнасці  $\rho$  некаторай масы ідэальнага газу ад ціску  $p$  пры ізатэрмічным працэсе.

11.20. Пэўная маса ідэальнага газу ізахорна нагрываецца, а потым ізабарна сціскаецца. Начарціць графікі гэтых працэсаў у каардынатах: а)  $p, V$ ; б)  $p, T$ ; в)  $\rho, T$ .

11.21. Некаторая маса ідэальнага газу ізабарна нагрываецца, а потым пасля ізатэрмічнага сціскання і ізахорнага ахаладжэння вяртаецца ў зыход-



Рыс.11.1



Рыс.11.2



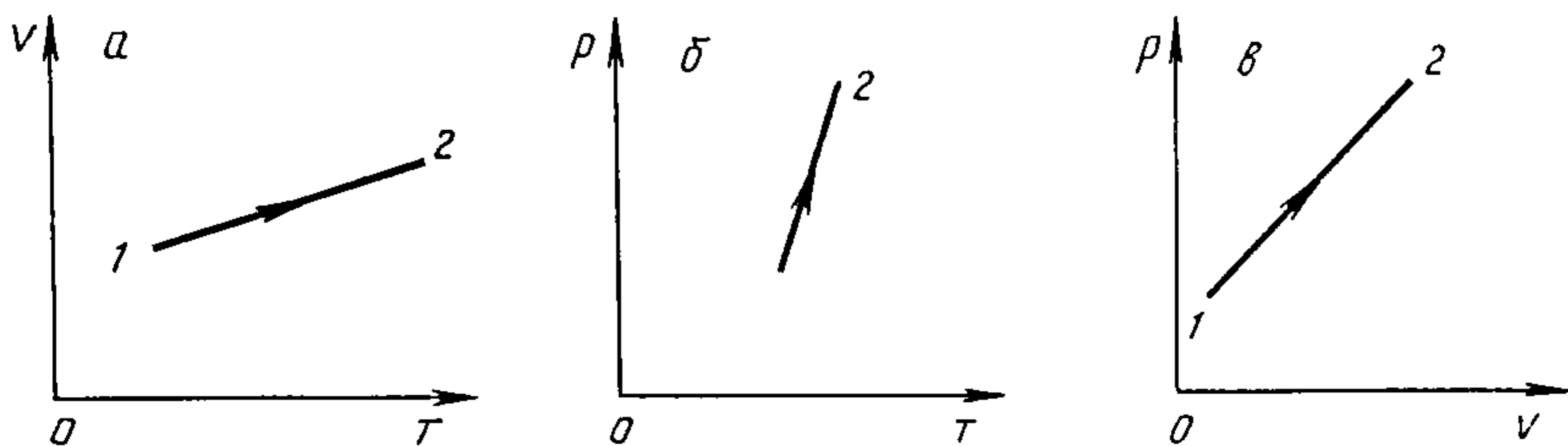


Рис. 11.3

ны стан. Начарціць графікі гэтых працэсаў у каардынатах  $p$ ,  $V$  і  $p$ ,  $T$ .

11.22. На рыс. 11.1 паказаны працэсы, якія адбываюцца з ідэальным газам пэўнай масы. Начарціць графікі гэтых працэсаў у каардынатах  $p$ ,  $V$  і  $p$ ,  $T$ .

11.23. На рыс. 11.2 паказаны ізатэрмы для двух ідэальных газаў з аднолькавымі масамі  $m$  і рознымі малярнымі масамі  $M$ , якія знаходзяцца пры аднолькавай тэмпературы. Высветліць, якая ізатэрма адносіцца да газу з большай малярнай масай. Якім будзе вынік у выпадку аднолькавых малярных мас  $M$  і розных мас газу  $m$ ?

11.24. Паказаць графічна ў каардынатах  $p$ ,  $T$  дзве ізахоры, адпаведныя розным масам аднаго і таго ж газу, якія займаюць аднолькавыя аб'ёмы.

11.25. Вызначыць характар змянення ціску (рыс. 11.3, а), аб'ёму (рыс. 11.3, б) і тэмпературы (рыс. 11.3, в) ідэальнага газу некаторай масы ў працэсах, паказаных на графіках.

11.26. Пры правядзенні доследа Тарычэлі ўнізе бараметрычнай трубкі ўтварылася бурбалка паветра аб'ёмам  $2,0 \text{ мм}^3$ . Якім стаў аб'ём бурбалкі, калі яна паднялася і знаходзіцца на адлегласці  $1,0 \text{ см}$  ад узроўня ртуці ў трубцы?

11.27. Аб'ём бурбалкі паветра па меры ўсплывання яе з дна возера на паверхню павялічваецца ў 3 разы. Якая глыбіня возера?

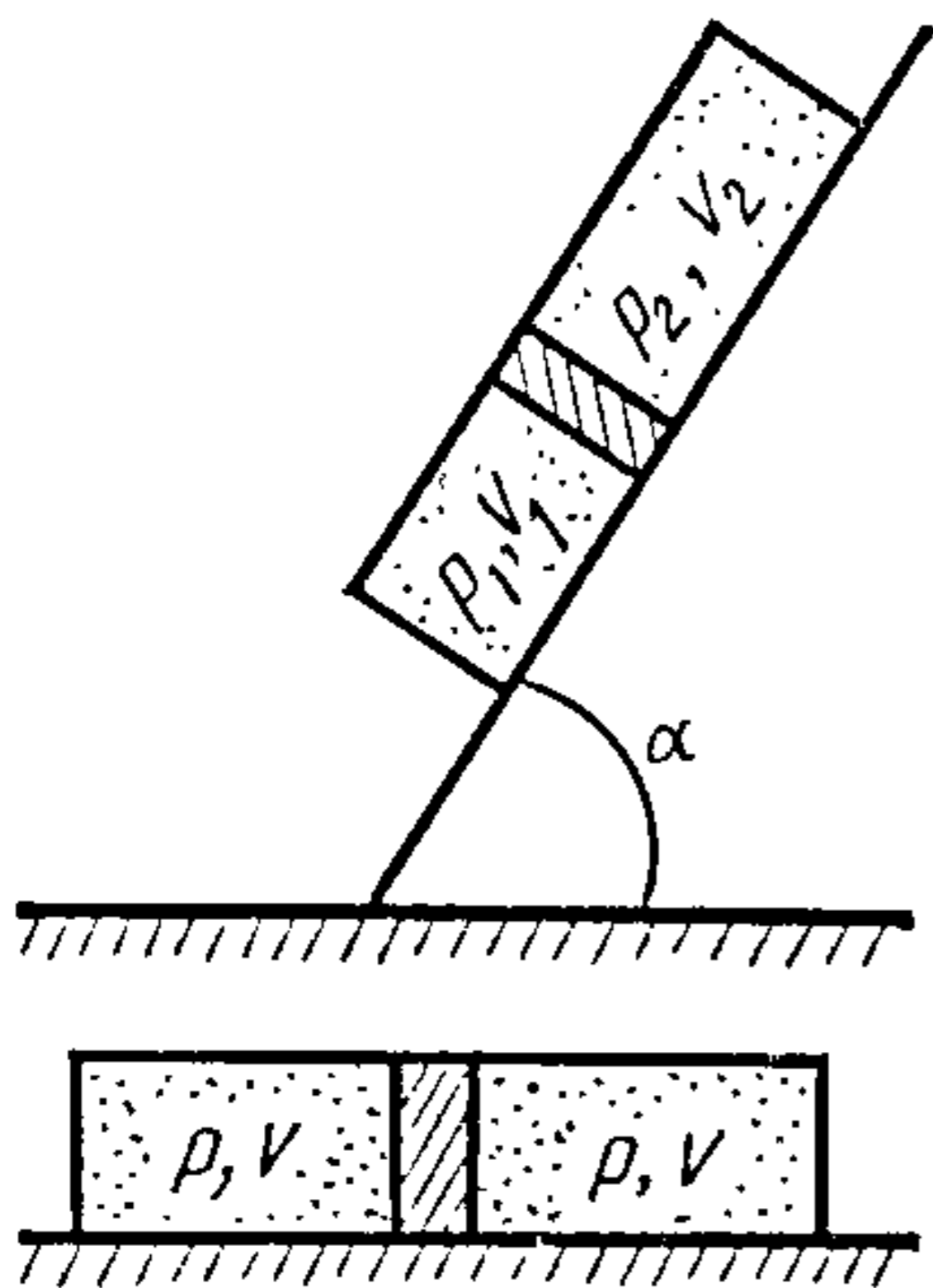
11.28. У шары дыяметрам  $20 \text{ см}$  знаходзіцца паветра масай  $7,0 \text{ г}$ . Да якой тэмпературы можна нагрэць гэты шар, калі максімальны ціск, які вытрымліваюць сценкі шара,  $0,30 \text{ МПа}$ ? Малярная маса паветра  $M = 0,029 \text{ кг/моль}$ .

11.29. Пры ізабарным награванні газу некаторай масы на  $1 \text{ К}$  яго аб'ём павялічваецца на  $1/300$  частку першапачатковага значэння. Вызначыць пачатковую тэмпературу газу.

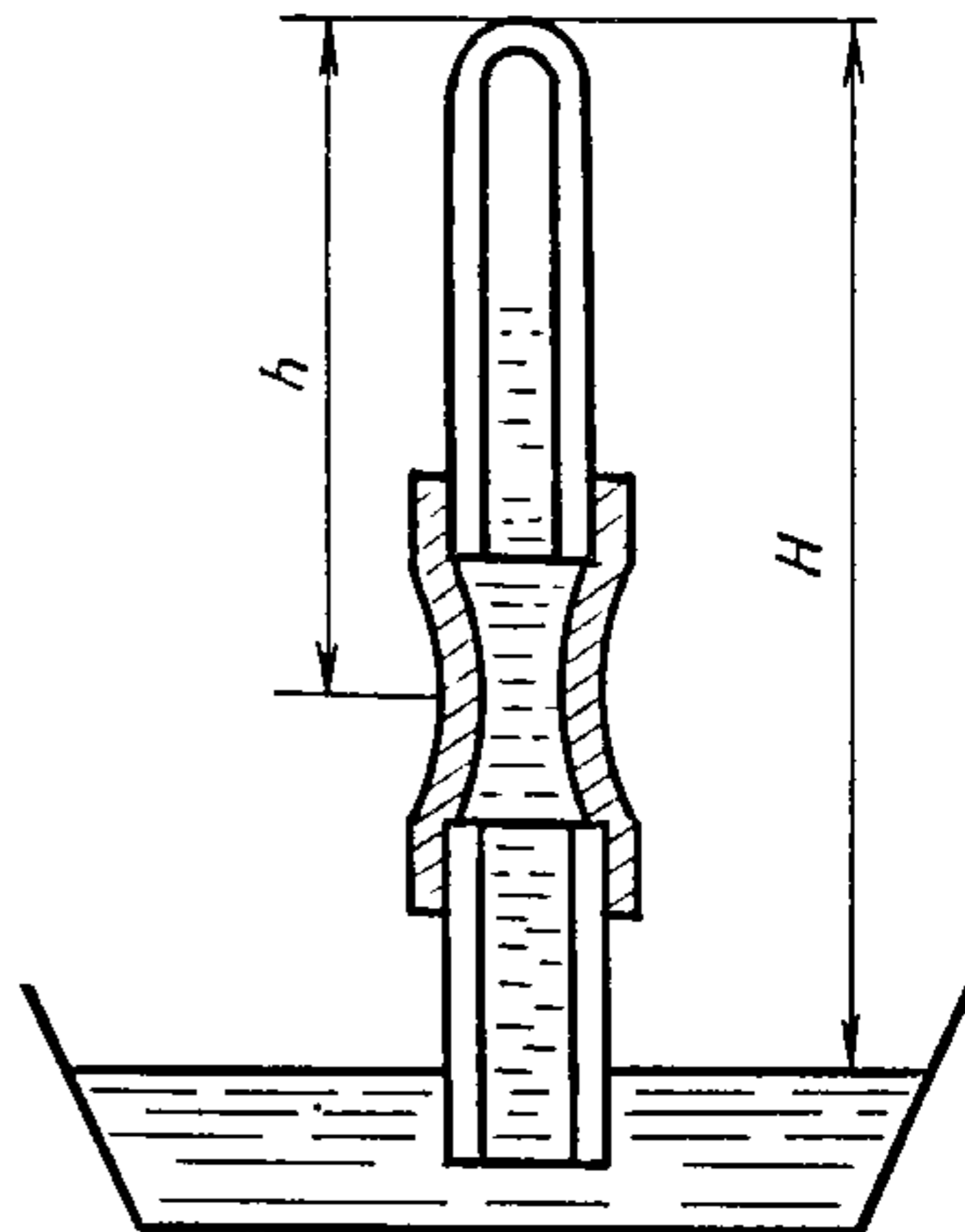
11.30. Адкрытая шкляная колба ёмістасцю  $0,40 \text{ дм}^3$ , у якой знаходзіцца паветра, нагрэта да  $127^\circ \text{ С}$ . Які аб'ём зойме вада ў колбе пры астыванні яе да  $27^\circ \text{ С}$ , калі пасля награвання яе горлачка апусціць у ваду?

11.31. Колькі пампаванняў  $n$  поршневай помпы трэба зрабіць, каб напампаваць пустую камеру футбольнага мяча аб'ёмам  $V = 2,5 \text{ дм}^3$  да ціску, які перавышае атмасферны ў 4 разы? За кожнае пампаванне помпа захоплівае з атмасферы паветра аб'ёмам  $V_0 = 200 \text{ см}^3$ . Тэмпературу мяча





Рыс.11.4



Рыс.11.5

лічыць пастаяннай.

11.32. Колькі пампаванняў поршневай помпы спатрэбіцца для таго, каб ціск у балоне аб'ёмам  $V_0 = 1,5 \text{ дм}^3$  паменшыць у  $k = 100$  разоў? Аб'ём камеры помпы  $V = 100 \text{ см}^3$ . Змяненне тэмпературы пры адпампоўванні газу не ўлічваць.

11.33. У адным балоне ёмістасцю  $15 \text{ дм}^3$  знаходзіцца газ пад ціскам  $0,2 \text{ МПа}$ , а ў другім — той жа газ пад ціскам  $1 \text{ МПа}$ . Балоны, тэмпература якіх аднолькавая, злучаны трубкай з кранам. Калі адкрыць кран, то ў абодвух балонах устанаўліваецца ціск  $0,4 \text{ МПа}$ . Якая ёмістасць другога балона?

11.34. Унутры трубы, якая напоўнена паветрам і закрыта з абодвух канцоў, можа слізгаць без трэння, шчыльна прылягаючы да сценак трубы, поршань масай  $m = 4,0 \text{ кг}$  і плошчай  $2,0 \text{ дм}^2$ . Вызначыць, як суадносяцца аб'ёмы паветра ў трубе з абодвух бакоў ад поршня пры яе слізганні па нахільнай плоскасці, якая ўтварае з гарызонтам вугал  $\alpha = 60^\circ$  (рыс. 11.4). Каэфіцыент трэння паміж трубай і нахільнай плоскасцю  $\mu = 0,25$ . Вядома, што ў гарызантальна ляжачай трубе поршань займае сярэдняе становішча, пры гэтым ціск паветра ў трубе  $p = 1,25 \text{ кПа}$ . Тэмпература паветра ў трубе пастаянная.

11.35. Ці будзе даваць правільныя паказанні чашачны ртутны барометр (рыс. 11.5), калі частка яго трубкі (ніжэй узроўню ртуці) зроблена з мяккай гумы?

11.36. У чашачны ртутны барометр трапіла паветра, у выніку чаго пры нармальних умовах барометр паказвае  $98,6 \text{ кПа}$ . Адлегласць ад узроўню ртуці ў трубцы да запаянага канца яе  $10,0 \text{ см}$ . Знайсці сапраўднае значэнне атмасфернага ціску, калі пры тэмпературы  $20^\circ \text{ С}$  барометр паказвае  $97,3 \text{ кПа}$ . Цеплавое расшырэнне ртуці і трубкі не ўлічваць.

11.37. U-падобная трубка, абодва канцы якой запаяны, запоўнена вадой

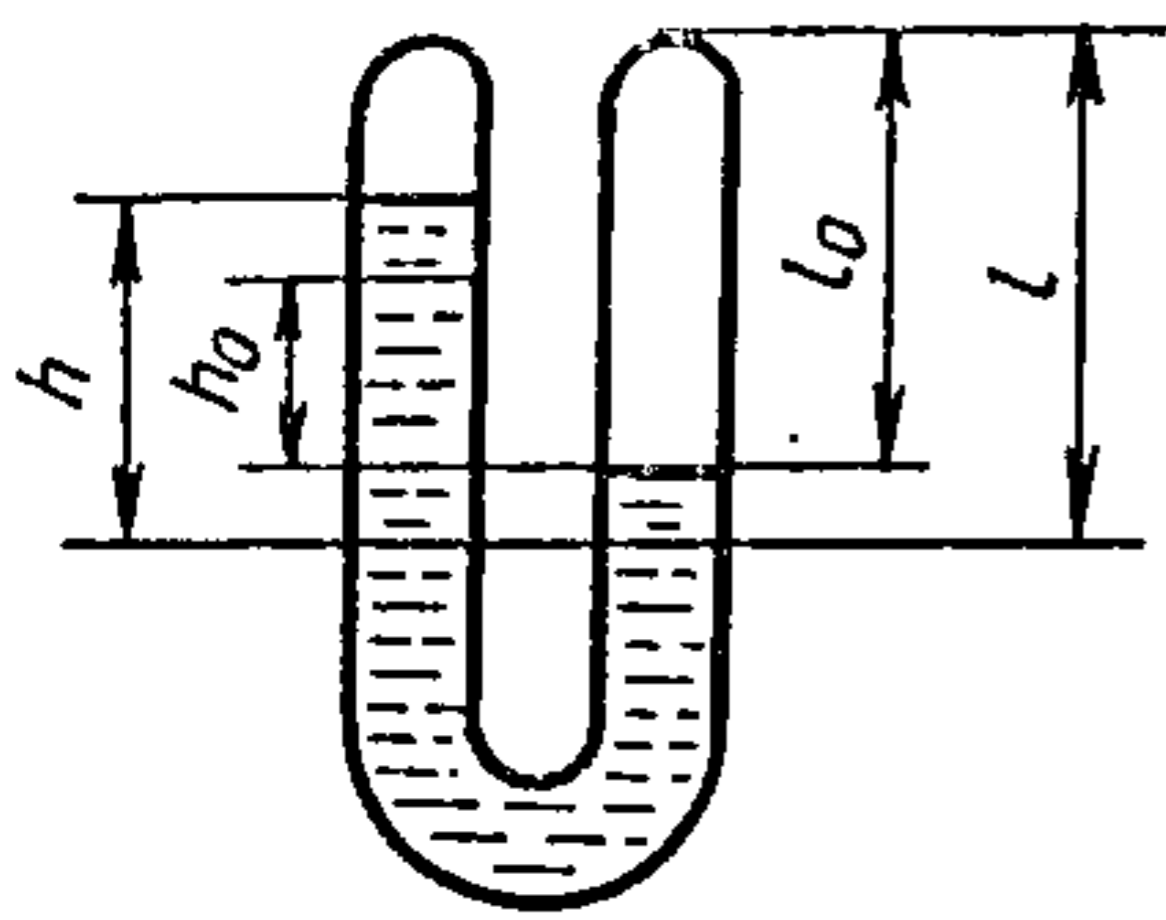


Рис. 11.6

(рис. 11.6). З аднаго канца паветра адпампавана, ціск паветра ў другім канцы пры тэмпературы  $20^\circ\text{C}$  роўны нармальнаму атмасфернаму. Якой будзе рознасць узроўняў вады ў калене, калі трубку нагрэць да  $100^\circ\text{C}$ ? Лічыць, што  $l_0 = 15\text{ м}$ .

11.38. У дзвюх пасудзінах аднолькавага аб'ёму знаходзяцца гелій і аргон, масы якіх роўныя. У колькі разоў ціск гелію большы, чым аргону, калі тэмпературы газаў аднолькавыя?

11.39. Ціск у цыліндры паравой машыны аб'ёмам  $20\text{ дм}^3$  пасля адкрыцця клапана паменшыўся на  $\Delta p = 0,81\text{ МПа}$ . Якая маса пары выпушчана з цыліндру? Тэмпературу пары лічыць  $100^\circ\text{C}$ .

11.40. Газометр змяшчае пры нармальных умовах вуглякіслы газ масай  $0,50\text{ кг}$ . Вызначыць масу вуглякіслага газу, які знаходзіцца ў газометры, калі тэрмометр паказвае  $17^\circ\text{C}$ , а манометр  $93,3\text{ кПа}$ .

11.41. Шчыльнасць газу пры ціску  $0,20\text{ МПа}$  і тэмпературы  $7^\circ\text{C}$  роўная  $2,41\text{ кг/м}^3$ . Якая маса 1 моль гэтага газу?

11.42. У бараметрычную трубку пры нармальных умовах трапіла паветра, у выніку чаго барометр паказаў ціск  $0,10\text{ МПа}$ . Якая шчыльнасць паветра над ртуццю?

11.43. Газ знаходзіцца пры тэмпературы  $20^\circ\text{C}$  і ціску  $0,50\text{ МПа}$ . Які ціск патрабуецца для таго, каб павялічыць шчыльнасць газу ў 2 разы, калі тэмпература яго будзе даведзена да  $80^\circ\text{C}$ ?

11.44. Вызначыць масу 1 моль сумесі, якая складаецца з кіслароду масай  $8,0\text{ г}$  і вуглякіслага газу масай  $22\text{ г}$ .

11.45. Лічачы, што паветра па масе складаецца з  $76\%$  азоту,  $23\%$  кіслароду і  $1\%$  аргону, знайсці масу 1 моль паветра.

11.46. Знайсці аб'ём сумесі, якая складаецца з азоту масай  $2,8\text{ кг}$  і кіслароду масай  $3,2\text{ кг}$ , пры тэмпературы  $17^\circ\text{C}$  і ціску  $0,40\text{ МПа}$ .

11.47. У балоне ёмістасцю  $14\text{ дм}^3$  знаходзіцца сумесь гелію з кіслародам масай  $64\text{ г}$  пры тэмпературы  $7^\circ\text{C}$  і ціску  $0,12\text{ МПа}$ . Знайсці масу гелію і масу кіслароду ў сумесі.

11.48. Вызначыць шчыльнасць сумесі, якая складаецца з гелію масай  $8,0\text{ г}$  і аргону масай  $4,0\text{ г}$ , пры тэмпературы  $17^\circ\text{C}$  і ціску  $0,10\text{ МПа}$ .

11.49. Грымучым газам называецца сумесь, якая складаецца з адной часткі вадароду і васьмі частак кіслароду. Вызначыць шчыльнасць грмухага газу пры нармальных умовах.

### Размеркаванне Максвела і Больцмана. Бараметрычная формула

11.50. З ядра атама радыю вылятаюць  $\alpha$ -часцінкі ( $M = 0,004\text{ кг/моль}$ ) са скорасцю  $15,3\text{ Мм/с}$ . Пры якой тэмпературы атамы гелію мелі б такую ж сярэдняю квадратычную скорасць?



11.51. Поўная кінетычная энергія малекул многаатамнага газу, маса якога 20 г, роўная 3,2 кДж. Знайсці сярэднюю квадратычную скорасць малекул гэтага газу.

11.52. Вызначыць сярэднюю квадратычную і сярэднюю арыфметычную скорасці пылінкі, якая знаходзіцца ў паветры ў завіслым стане пры тэмпературы 17 ° С, калі маса яе 0,10 нг.

11.53. У колькі разоў сярэдняя квадратычная скорасць малекул вадароду большая за сярэднюю квадратычную скорасць малекул вадзяной пары пры той жа тэмпературы?

11.54. Пры якой тэмпературы малекулы аргону маюць такую ж сярэднюю квадратычную скорасць, як малекулы гелію пры 100 К?

11.55. У пасудзіне аб'ёмам 1 дм<sup>3</sup> знаходзіцца газ масай 6 г пад ціскам 80 кПа. Вызначыць сярэднюю квадратычную скорасць малекулы газу.

11.56. Вызначыць сярэднюю квадратычную скорасць малекул некаторага газу, калі вядома, што шчыльнасць яго 30 г/м<sup>3</sup>, а ціск, які ён аказвае на сценкі пасудзіны, 3,6 кПа.

11.57. У аб'ёме 1,0 см<sup>3</sup> пры ціску 20 кПа знаходзіцца  $5,0 \cdot 10^{19}$  малекул гелію. Вызначыць сярэднюю квадратычную скорасць малекул пры гэтых умовах.

11.58. Вызначыць сярэднюю арыфметычную скорасць малекул газу, калі вядома, што сярэдняя квадратычная скорасць іх 600 м/с.

11.59. Якая найбольш імаверная скорасць малекул метану і гелію пры тэмпературы 127 ° С?

11.60. Выкарыстоўваючы размеркаванне Максвела і паняцце адноснай скорасці  $u$  як адносіну скорасці малекул  $v$  да найбольш імавернай скорасці  $v_B$ , атрымаць тое ж размеркаванне ў прыведзеным выглядзе:

$$dN(u) = N \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 du.$$

11.61. Якая частка малекул азоту пры тэмпературы 7 ° С валодае скарасцямі ў інтэрвале ад 500 да 510 м/с?

11.62. Якая частка малекул кіслароду валодае скарасцямі, якія адрозніваюцца ад найбольш імавернай не больш чым на 10 м/с пры тэмпературах 0 ° С і 300 ° С?

11.63. Вызначыць адносіну ліку малекул вадароду са скарасцямі 2,0—2,01 км/с да ліку малекул са скарасцямі 1,0—1,01 км/с, калі тэмпература вадароду 0 ° С.

11.64. Вызначыць вышыню гары, калі ціск на яе вяршыні роўны палове ціску на ўзроўні мора. Тэмпературу лічыць усюды аднолькавай і роўнай 0 ° С.

11.65. На паверхні Зямлі барометр паказвае 101 кПа. Якое будзе падажанне барометра пры пад'ёме яго на Астанкінскую тэлевізійную вежу, вышыня якой 540 м? Тэмпературу лічыць усюды аднолькавай і роўнай 7 ° С.

11.66. Пры пад'ёме верталёта на некаторую вышыню барометр, які



знаходзіцца ў яго кабіне, змяніў сваё паказанне на 11 кПа. На якой вышыні ляціць верталёт, калі на ўзлётнай пляцоўцы барометр паказваў 0,1 МПа? Температуру паветра лічыць усюды аднолькавай і роўнай 17 °С.

11.67. Знайсці ціск і лік малекул у адзінцы аб'ёму паветра на вышыні 2,0 км над узроўнем мора. Ціск на ўзроўні мора 101 кПа, а тэмпература 10° С. Змяненне тэмпературы з вышынёй не ўлічваць.

11.68. Пылінкі масай 1 аг завіслыя ў паветры. Вызначыць таўшчыню слою паветра, у межах якога канцэнтрацыя пылінак адрозніваецца не больш чым на 1,0 %. Тэмпературу паветра ва ўсім аб'ёме лічыць аднолькавай і роўнай 27 °С.

11.69. Каля паверхні Зямлі малекул вадароду амаль у  $1,0 \cdot 10^6$  меней, чым малекул азоту. На якой вышыні лік малекул вадароду будзе роўны ліку малекул азоту? Сярэдняю тэмпературу атмасферы прыняць роўнай 0 °С.

## §12. З'ЯВЫ ПЕРАНОСУ У ГАЗАХ

Сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул газу:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n},$$

дзе  $d$  — эфектыўны дыяметр малекул;  $n$  — канцэнтрацыя малекул.

Сярэдні лік сутыкненняў адной малекулы ў адзінку часу

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle.$$

Агульны лік сутыкненняў усіх малекул у адзінцы аб'ёму за адзінку часу

$$Z_V = \frac{1}{2} \langle z \rangle n.$$

Лік малекул, якія ўдараюцца за адзінку часу ў адзінкавую пляцоўку, змешчаную ў газе

$$z_0 = n \langle v \rangle / 4.$$

Маса пэўнага кампаненту газу  $dm$ , якая дыфундзіруе за час  $dt$  праз пляцоўку  $dS$ , размешчаную перпендыкулярна восі  $X$ ;

$$dm = - D \frac{d\rho}{dx} dS dt,$$

дзе  $D$  — каэфіцыент дыфузіі;  $d\rho/dx$  — градыент шчыльнасці. Знак «мінус» абумоўлены тым, што перанос масы адбываецца ў напрамку памяншэння шчыльнасці.

Каэфіцыент дыфузіі

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle.$$

Сіла ўнутранага трэння  $dF$  паміж двума сляямі плошчаю  $dS$ , якія рухаюцца з рознымі скорасцямі;

$$dF = -\eta \frac{dv}{dx} dS,$$

дзе  $\eta$  — дынамічная вязкасць;  $dv/dx$  — градыент скорасці цячэння газу ў напрамку, перпендыкулярным пляцоўцы  $dS$ . Знак «мінус» азначае, што сіла трэння паміж сляямі, якія рухаюцца больш хутка, накіравана супраць скорасці.

Дынамічная вязкасць

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho,$$

дзе  $\rho$  — шчыльнасць газу.

Колькасць цеплыні, якая пераносіцца за час  $dt$  праз пляцоўку  $dS$ , размешчаную перпендыкулярна восі  $X$ ;

$$dQ = -\kappa \frac{dT}{dx} dS dt,$$

дзе  $\kappa$  — цеплаправоднасць;  $dT/dx$  — градыент тэмпературы. Знак «мінус» паказвае, што перанос унутранай энергіі адбываецца ў напрамку ўбывання тэмпературы.

Цеплаправоднасць

$$\kappa = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho c_V,$$

дзе  $c_V$  — удзельная цеплаёмістасць газу пры пастаянным аб'ёме.

## Сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу. Лік сутыкненняў

12.1. У міжзоркавай прасторы знаходзіцца 1 малекула на  $15 \text{ см}^3$ . Якая сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул, калі лічыць, што навакольныя малекулы з'яўляюцца малекуламі вадароду?

12.2. Чаму роўная сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул гелію, калі сярэдняя адлегласць паміж імі  $4 \text{ нм}$ ?

12.3. Сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул паветра пры нармальным ціску  $62,1 \text{ нм}$ . Вызначыць сярэднюю даўжыню свабоднага прабегу малекул паветра пры звышвысокім вакууме ( $1,33 \text{ нПа}$ ). Тэмпературу лічыць адной і той жа.

12.4. У балоне ёмістасцю  $10 \text{ дм}^3$  знаходзіцца гелій масай  $2,0 \text{ г}$ . Вызначыць сярэднюю даўжыню свабоднага прабегу малекул гелію.

12.5. Якая шчыльнасць разрэджанага кіслароду, калі сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу яго малекул  $1,0 \text{ см}$ ?

12.6. Вызначыць сярэднюю квадратычную скорасць малекул аргону, якія знаходзяцца пад ціскам  $0,10 \text{ МПа}$ , калі вядома, што сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу яго малекул  $0,10 \text{ мкм}$ .

12.7. Які ціск трэба стварыць у колбе дыяметрам  $0,10 \text{ м}$ , што змяшчае азот пры тэмпературы  $20^\circ \text{ С}$ , каб атрымаць вакуум?

12.8. Ці можна лічыць стан газу пры ціску  $133 \text{ мкПа}$  высокім вакуумам, калі ён створаны ў колбе дыяметрам  $l = 0,50 \text{ м}$ , у якой знаходзіцца кісларод пры  $0^\circ \text{ С}$ ?

12.9. У сферычнай пасудзіне дыяметрам  $l = 0,40 \text{ м}$  знаходзіцца азот пры тэмпературы  $20^\circ \text{ С}$ . Пры якім ціску малекулы азоту практычна не будуць сутыкацца паміж сабой?

12.10. У сферычнай пасудзіне ёмістасцю  $2,0 \text{ дм}^3$  знаходзіцца вадарод. Пры якой шчыльнасці вадароду малекулы яго практычна не будуць сутыкацца паміж сабой?

12.11. Якое сярэдняе значэнне прамежку часу паміж двума пасля-



доўнымі сутыкненнямі малекул вадароду пры ціску 13,3 Па і тэмпературы 100 ° С?

12.12. Сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул гелію пры нармальных умовах 230 нм. Знайсці сярэдняю працягласць свабоднага прабегу малекул гелію пры ціску 1,0 мПа і тэмпературы 17 ° С.

12.13. Колькі раз за 1,0 с сутыкаюцца малекулы вуглякіслага газу, які знаходзіцца пры нармальных умовах?

12.14. Сярэдняя квадратычная скорасць малекул некаторага газу 900 м/с, а сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу пры гэтых умовах 4,0 мкм. Вызначыць сярэдні лік сутыкненняў малекул гэтага газу за 1 с.

12.15. Сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул вадароду пры некаторым ціску і тэмпературы 21 ° С роўная 90 нм. У выніку ізатэрмічнага працэсу ціск газу павялічыўся ў 3 разы. Знайсці сярэдні лік сутыкненняў малекул вадароду за 1 с у канцы працэсу.

12.16. Пры тэмпературы 47 ° С і некаторым ціску сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул кіслароду 40 нм. У выніку ізатэрмічнага сціскання аб'ём газу паменшыўся ў 2 разы. Вызначыць сярэдні лік сутыкненняў малекул кіслароду за 1,0 с у канцы сціскання.

12.17. У пасудзіне ёмістасцю 1,0 дм<sup>3</sup> знаходзіцца азот пры тэмпературы 7 ° С і ціску 0,20 МПа. Вызначыць лік сутыкненняў малекул азоту ў гэтай пасудзіне за 1,0 с.

12.18. Катод рэнтгенаўскай трубкі мае выгляд дыска плошчаю 1,0 см<sup>2</sup>. Вызначыць лік малекул паветра, якія ўдараюцца за 1,0 с аб катод пры тэмпературы 17 ° С і ціску 13,3 мПа.

12.19. Як зменіцца лік удараў малекул аднаатамнага газу аб сценку балона плошчаю 1 м<sup>2</sup> за 1 с, калі ціск газу павялічыцца ў 4 разы, у выпадку: 1) ізатэрмічнага; 2) ізахорнага працэсаў?

### Дыфузія, вязкасць і цеплаправоднасць газаў

12.20. Сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул гелію пры нармальных умовах 0,23 мкм. Вызначыць каэфіцыент дыфузіі гелію пры гэтых умовах.

12.21. Вызначыць каэфіцыент дыфузіі кіслароду пры нармальных умовах.

12.22. Які каэфіцыент дыфузіі вадароду пры некаторых умовах, калі каэфіцыент дыфузіі гелію пры гэтых умовах 92 мм<sup>2</sup>/с?

12.23. Каэфіцыент дыфузіі кіслароду пры нармальных умовах 14,1 мм<sup>2</sup>/с. Вызначыць, якім будзе каэфіцыент дыфузіі пры тэмпературы 50 ° С, калі награванне газу адбываецца пры пастаянным аб'ёме.

12.24. У колькі разоў зменіцца каэфіцыент дыфузіі двухатамнага газу пры памяншэнні ціску ў 2 разы ў выніку ізатэрмічнага расшырэння?

12.25. Каэфіцыент дыфузіі вуглякіслага газу пры нармальных умовах 10 мм<sup>2</sup>/с. Вызначыць дынамічную вязкасць вуглякіслага газу пры гэтых умовах.



12.26. Вылічыць каэфіцыент дыфузіі і дынамічную вязкасць азоту пры ціску 0,10 МПа і тэмпературы 7 ° С.

12.27. Дынамічная вязкасць гелію пры тэмпературы 0 ° С роўная 16,3 мкПа·с. Вызначыць дыяметр малекул гелію.

12.28. Знайсці дынамічную вязкасць паветра пры тэмпературы 100 ° С і нармальным ціску, калі пры нармальных умовах яна роўная 17,2 мкПа·с.

12.29. Пры якой тэмпературы дынамічная вязкасць азоту роўная дынамічнай вязкасці вадароду пры тэмпературы 19 ° С?

12.30. Прастора паміж двума кааксіяльнымі цыліндрамі, радыусы якіх роўныя 5 і 5,5 см, запоўнена кіслародам пры тэмпературы 0 ° С. Вызначыць, вышэй якога ціску дынамічная вязкасць кіслароду не будзе залежаць ад ціску.

12.31. Вызначыць цеплаправоднасць хлору, калі вядома, што дынамічная вязкасць яго пры гэтых умовах роўная 12,9 мкПа·с.

12.32. Вызначыць цеплаправоднасць аргону пры нармальных умовах.

12.33. Цеплаправоднасць трохатамнага газу з жорсткімі (аб'ёмнымі) малекуламі роўная 1,45 сВт/(м·К), а каэфіцыент дыфузіі пры тых жа ўмовах 10 мкм<sup>2</sup>/с. Вызначыць лік малекул у газе аб'ёмам 1,0 м<sup>3</sup> пры гэтых умовах.

12.34. Знайсці гранічнае значэнне ціску, ніжэй якога цеплаправоднасць паветра, што знаходзіцца паміж сценамі пасудзіны Дзюара, пачынае залежаць ад ціску. Адлегласць паміж сценамі  $l = 6,0$  мм. Дыяметр малекулы паветра прыняць роўным 0,30 нм. Тэмпература газу 17 ° С.

### § 13. ПЕРШЫ ЗАКОН ТЭРМАДЫНАМІКІ

Першы закон тэрмадынамікі можа быць запісаны ў выглядзе:

$$\delta Q = dU + \delta A',$$

дзе  $\delta Q$ —колькасць цеплыні, перададзеная сістэме;  $dU$ —прырашчэнне ўнутранай энергіі сістэмы;  $\delta A'$ —праца, выкананая сістэмай супраць знешніх сіл.

Унутраная энергія ідэальнага газу

$$U = \frac{m}{M} C_V T,$$

дзе  $C_V$ —малярная цеплаёмкасць газу пры пастаянным аб'ёме.

Малярная цеплаёмкасць газу пры пастаянным аб'ёме

$$C_V = \frac{i}{2} R.$$

Малярная цеплаёмкасць газу пры пастаянным ціску

$$C_p = C_V + R.$$

Праца, якую выконвае газ,

$$A' = \int p dV.$$

Праца пры ізатэрмічным працэсе:

$$A' = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Ураўненне адыябатнага працэсу (ураўненне Пуасона)

$$pV^\gamma = \text{const},$$

дзе  $\gamma = C_p / C_V$  — паказчык адыябаты.

Работа пры адыябатным працэсе:

$$A' = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2).$$

Ураўненне палітрапічнага працэсу

$$pV^n = \text{const},$$

дзе  $n = C - C_p / C - C_V$  — паказчык палітропы;  $C$  — малярная цеплаёмістасць газу пры палітрапічным працэсе.

Работа пры палітрапічным працэсе

$$A' = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{n-1} \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right).$$

Ураўненне Бернулі для асяроддзя з пераменнай шчыльнасцю (газы пры вязкіх скарасцях цячэння) пры не вельмі вялікіх перападах вышынь

$$\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = 0.$$

дзе  $v_1, v_2$  — скорасці газу ў двух адвольных пунктах 1 і 2 лініі току. Інтэграл  $\int_1^2 dp/\rho$  залежыць ад віду працэсу змянення стану газу паміж гэтымі пунктамі.

Для адыябатнага цячэння ідэальнага газу ураўненне Бернулі

$$\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{R}{M} (T_2 - T_1) = 0.$$

## Цеплаёмістасць

13.1. Знайсці малярныя цеплаёмістасці  $C_V$  і  $C_p$ , а таксама іх адносіну  $\gamma$  для ідэальнага газу, які складаецца з малекул: а) аднаатамных; б) двухатамных з жорсткімі малекуламі; в) двухатамных з пругкімі малекуламі; г) трохатамных з жорсткімі (аб'ёмнымі) малекуламі; д) трохатамных з пругкімі (аб'ёмнымі) малекуламі.

13.2. Удзельная цеплаёмістасць пры пастаянным ціску некаторага газу 970 Дж/(кг·К), малярная маса яго 0,03 кг/моль. Вызначыць, якім лікам ступеняў свабоды валодаюць малекулы гэтага газу.

13.3. Рознасць паміж удзельнымі цеплаёмістасцямі пры пастаянным ціску і пастаянным аб'ёме некаторага газу роўная 260 Дж/(кг·К). Вызначыць малярную масу гэтага газу.

13.4. Шчыльнасць некаторага газу пры нармальным умовах  $\rho = 1,25$  кг/м<sup>3</sup>. Адносіна ўдзельных цеплаёмістасцяў 1,4. Вызначыць удзельныя цеплаёмістасці  $c_p$  і  $c_V$  гэтага газу.

13.5. Вызначыць  $\gamma$  для газавай сумесі, якая складаецца з вадароду масай 4,0 г і вуглякіслага газу масай 22,0 г.

13.6. Адносіна ўдзельных цеплаёмістасцяў сумесі, якая складаецца з некалькіх моляў азоту і 5 моляў аміяку, 1,35. Вызначыць лік моляў азоту ў сумесі.

13.7. Вызначыць удзельныя цеплаёмістасці  $c_p$  і  $c_v$  сумесі, якая складаецца з азоту ў колькасці 1 моль, метану — 4 моль і аргону масай 8,0 г.

13.8. Паветра змяшчае 25 % вадзяной пары. Лічачы сухое паветра двухатамным газам з малярнай масай 0,029 кг/моль, вызначыць удзельную цеплаёмістасць вільготнага паветра пры пастаянным ціску.

13.9. Знайсці ўдзельныя цеплаёмістасці паветра  $c_p$  і  $c_v$ , лічачы, што ў яго саставе знаходзіцца: азот — 76 %, кісларод — 23, аргон — 1,0 %.

13.10. Колькасць цеплыні, неабходнай пры награванні газу на 25 К пры пастаянным ціску, роўная 500 Дж, а колькасць цеплыні, якая вылучаецца пры ахаладжэнні таго ж газу на 75 К пры пастаянным аб'ёме, 1,07 кДж. Вызначыць  $\gamma$  дадзенага газу.

13.11. Знайсці малярную цеплаёмістасць ідэальнага газу ў працэсе, пры якім тэмпература газу: 1) прапарцыянальная квадрату яго аб'ёму; 2) адваротна прапарцыянальная яго аб'ёму. Цеплаёмістасць газу ў колькасці 1 моль пры пастаянным аб'ёме роўная  $C_v$ .

### Першы закон тэрмадынамікі ў прымяненні да ідэальнага газу

13.12. Шмататамны газ, які знаходзіцца пад ціскам 0,10 МПа пры тэмпературы 7 °С, быў ізабарна нагрэты на 40 К, у выніку чаго ён заняў аб'ём 8,0 дм<sup>3</sup>. Вызначыць колькасць цеплыні, перададзенай газу.

13.13. У закрытай пасудзіне ёмістасцю 20 дм<sup>3</sup> змяшчаецца аднаатамны газ, шчыльнасць якога 0,20 кг/м<sup>3</sup>. Колькасць цеплыні, неабходнай для награвання газу на 80 К пры гэтых умовах, роўная 997 Дж. Знайсці малярную масу гэтага газу.

13.14. Газ, для якога  $c_p / c_v = 4/3$ , знаходзіцца пад ціскам  $p = 0,20$  МПа і займае аб'ём  $V_1 = 3,0$  дм<sup>3</sup>. У выніку ізабарнага награвання аб'ём яго павялічыўся ў 3 разы. Вызначыць колькасць цеплыні, перададзенай газу.

13.15. Закрыты балон ёмістасцю 0,80 м<sup>3</sup> запоўнены азотам пад ціскам 2,3 МПа пры тэмпературы 20 °С. Колькасць цеплыні, перададзенай газу, роўная 4,6 МДж. Вызначыць тэмпературу і ціск у канцы працэсу.

13.16. Двухатамны газ знаходзіцца ў закрытым балоне ёмістасцю 5,0 дм<sup>3</sup> пад ціскам 0,20 МПа. Пасля награвання ціск у балоне павялічыўся ў 4 разы. Вызначыць колькасць цеплыні, перададзенай газу.

13.17. У цыліндры дыяметрам  $d = 40$  см змяшчаецца двухатамны газ аб'ёмам  $V = 80$  дм<sup>3</sup>. На колькі неабходна павялічыць нагрузку поршня пры падводзе колькасці цеплыні  $Q = 84$  Дж, каб поршань не прыйшоў у рух?

13.18. Начарціць для ідэальнага газу прыкладныя графікі ізахорнага, ізабарнага, ізатэрмічнага і адыябатнага працэсаў на дыяграмах: а)  $p, V$ ; б)  $p, T$ ; в)  $V, T$ .



13.19. Двухатомны газ, які знаходзіцца пры тэмпературы  $250^\circ\text{C}$ , сціскаюць ізатэрмічна так, што яго аб'ём памяншаецца ў 3 разы. Затым газ расшыраецца адыябатна да пачатковага ціску. Знайсці тэмпературу газу ў канцы адыябатнага расшырэння.

13.20. Двухатомны газ, які знаходзіцца пры тэмпературы  $22^\circ\text{C}$ , адыябатна сціскаюць так, што яго ціск узрастае ў 2 разы, а затым ахалоджваюць пры пастаянным аб'ёме да пачатковага ціску. Вылічыць канечную тэмпературу газу.

13.21. У якім выпадку ідэальны газ пры аднолькавым павелічэнні аб'ёму выконвае большую работу: пры ізабарным, ізатэрмічным ці адыябатным працэсе?

13.22. У якім выпадку над ідэальным газам пры аднолькавай ступені яго сціскання  $n = V_1 / V_2$  выконваецца большая работа: пры ізабарным, ізатэрмічным ці адыябатным працэсе?

13.23. Кісларод масай 64 г нагрэлі на 20 К пры пастаянным ціску. Знайсці работу, выкананую газам.

13.24. Газ, які займае аб'ём  $22\text{ дм}^3$  пад ціскам  $0,10\text{ МПа}$ , ізабарна нагрэты ад  $20$  да  $100^\circ\text{C}$ . Вызначыць работу, выкананую газам.

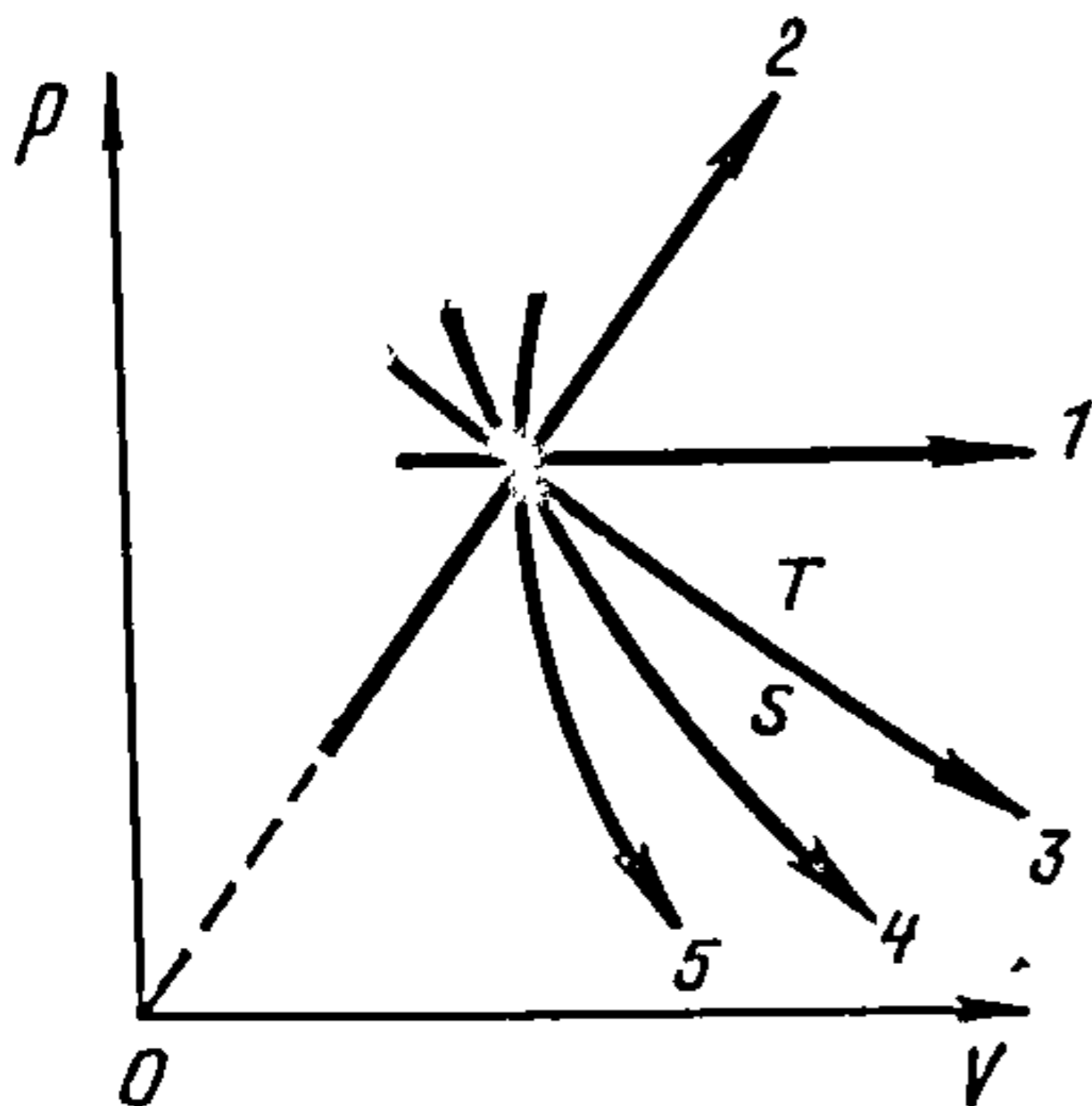
13.25. Трохатомны газ, які складаецца з жорсткіх (аб'ёмных) малекул, выконвае работу 245 Дж. Якая колькасць цеплыні была падведзена да газу, калі ён расшыраецца: 1) ізабарна; 2) ізатэрмічна?

13.26. У час ізабарнага сціскання пры пачатковай тэмпературы  $100^\circ\text{C}$  аб'ём кіслароду масай 10 кг паменшыўся ў 1,25 разы. Вызначыць работу, выкананую газам, і колькасць адведзенай цеплыні.

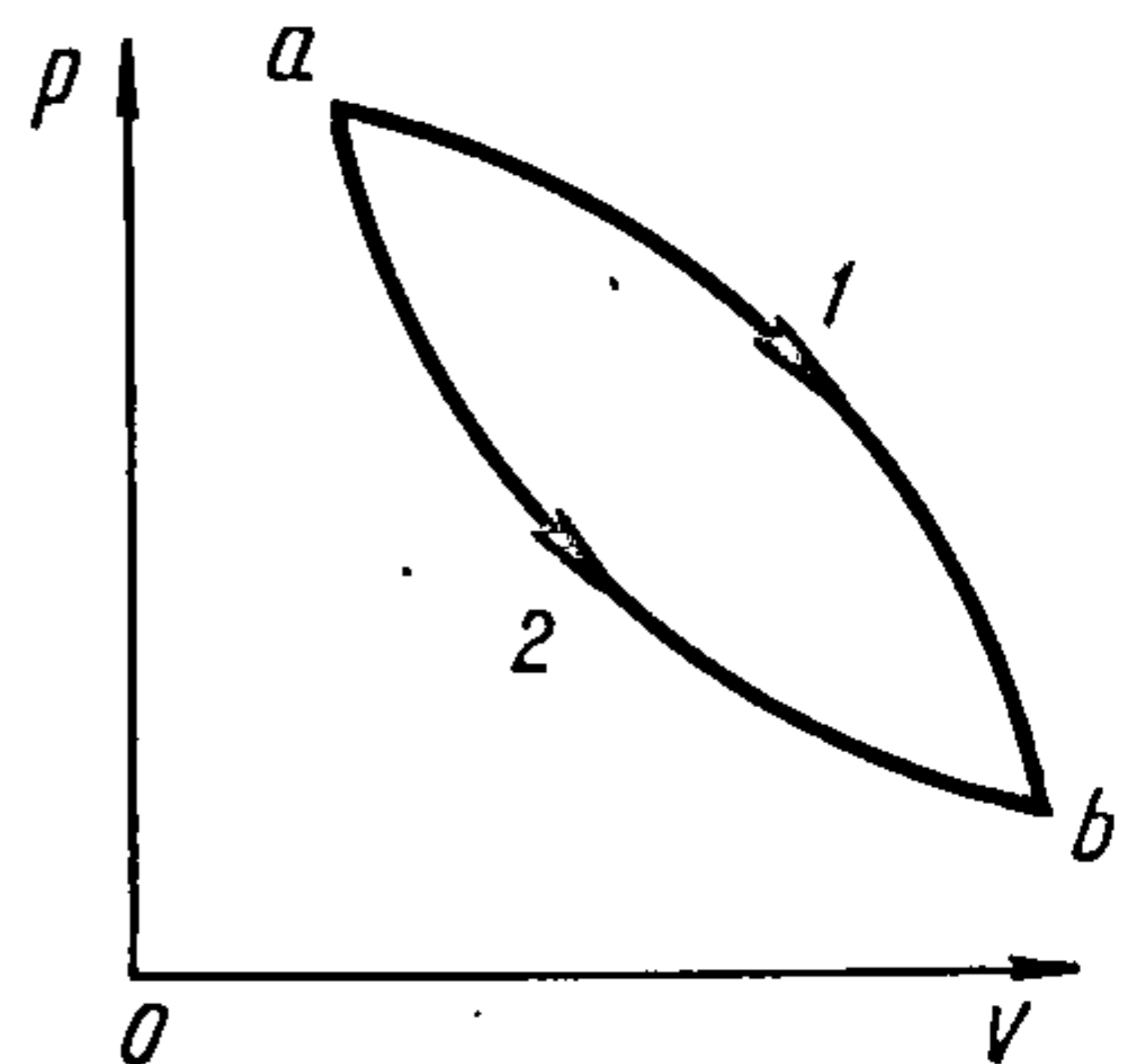
13.27. На рыс. 13.1 паказаны графікі ізапрацэсаў у каардынатах  $p, V$ . Як зменіцца ўнутраная энергія ідэальнага газу ў ходзе кожнага з працэсаў?

13.28. Начарціць для ідэальнага газу прыкладныя графікі: а) ізахорнага, ізабарнага і адыябатнага працэсаў на дыяграме  $U, T$ ; б) ізахорнага, ізабарнага, ізатэрмічнага і адыябатнага працэсаў на дыяграмах  $U, V$  і  $U, p$ .

13.29. Ідэальны газ некаторай масы пераходзіць з стану  $a$  ў стан  $b$  двума



Рыс.13.1



Рыс.13.2

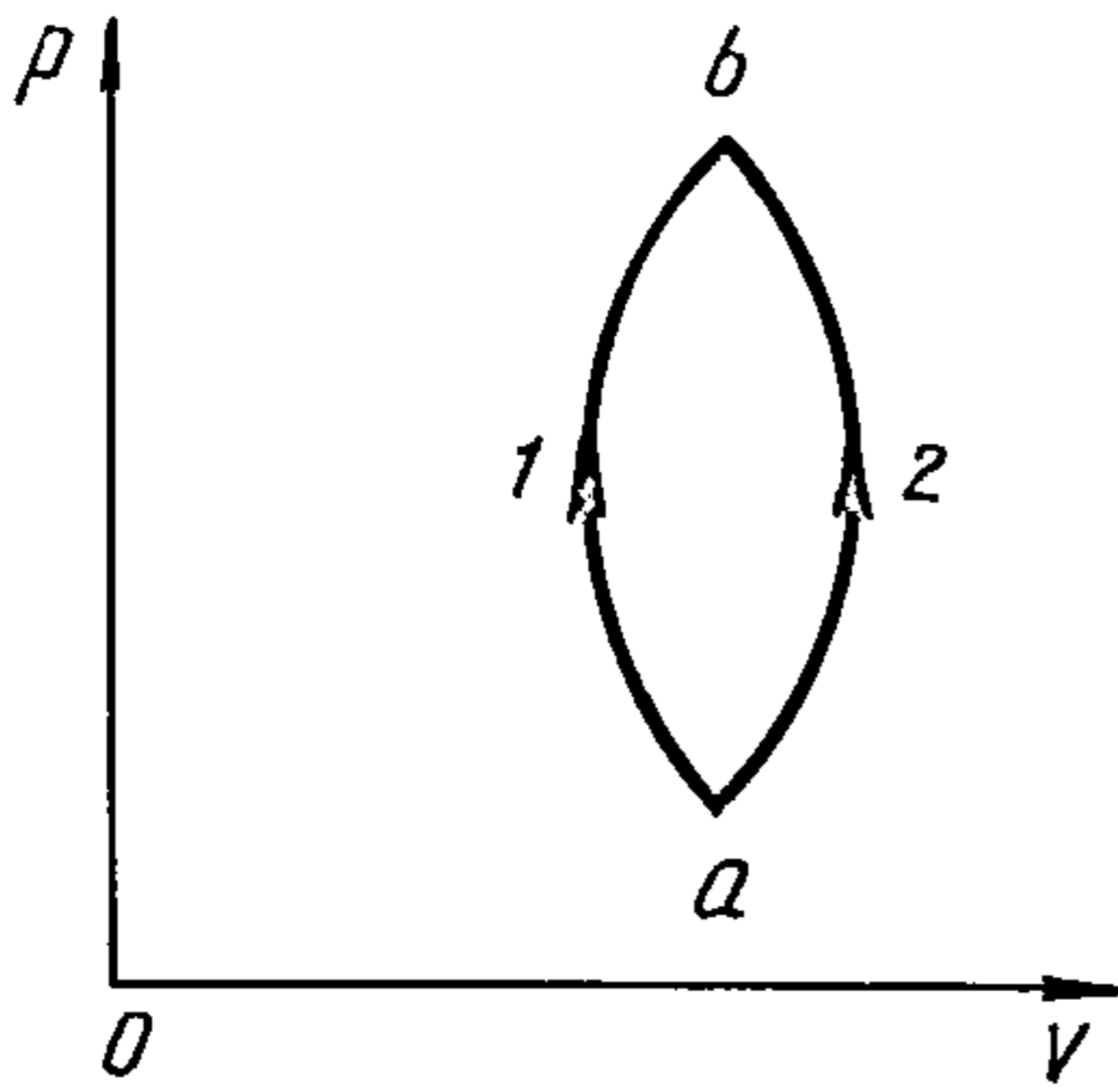


Рис.13.3

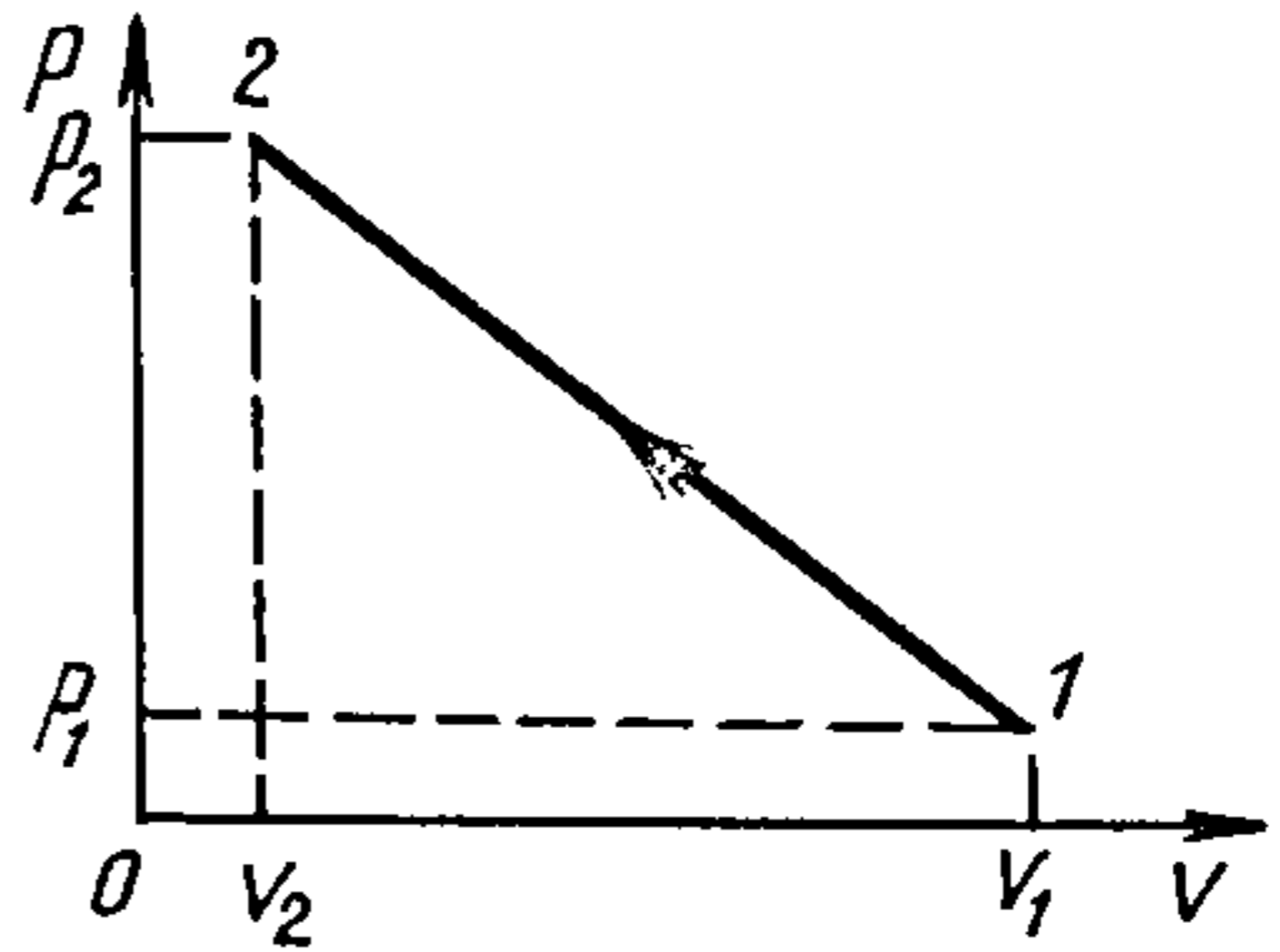


Рис.13.4

розными способами: 1 і 2 (рис. 13.2). Ці аднолькавыя ў кожным працэсе: а) работа, выкананая газам; б) прырашчэнне яго ўнутранай энергіі; в) перададзеная газу колькасць цеплыні?

13.30. Некаторая колькасць ідэальнага газу пераходзіць з стану *a* ў стан *b* з дапамогай двух розных працэсаў: 1 і 2 (рис. 13.3). Пры якім працэсе работа, выкананая газам, будзе дадатнай, а пры якім — адмоўнай?

13.31. Аргон масай 10,0 г нагрэты на 100 К пры пастаянным ціску. Вызначыць колькасць цеплыні, перададзенай газу, прырашчэнне ўнутранай энергіі і работу, выкананую газам.

13.32. Якая частка цеплыні, падведзенай да ідэальнага газу пры ізабарным працэсе, расходуюцца на павелічэнне яго ўнутранай энергіі і якая — на работу пры расшырэнні ў выпадку: а) аднаатамных; б) двухатамных з жорсткімі малекуламі; в) трохатамных з жорсткімі (аб'ёмнымі) малекуламі газаў?

13.33. Аднаатамны газ, які знаходзіцца пад ціскам 0,30 МПа, ізабарна расшыраецца ад 2,0 да 7,0 дм<sup>3</sup>. Вызначыць работу, выкананую газам, і прырашчэнне яго ўнутранай энергіі.

13.34. Пры ізабарным расшырэнні некаторай масы трохатамнага газу з жорсткімі (аб'ёмнымі) малекуламі, які знаходзіцца пад ціскам 0,2 МПа, унутраная энергія яго змянілася на 4,8 кДж. Знайсці прырашчэнне аб'ёму газу.

13.35. Вуглякіслы газ масай 4,4 г пад ціскам 0,10 МПа пры тэмпературы 87 °С адыябатна сціскаюць да 1/20 яго пачатковага аб'ёму. Вызначыць канечную тэмпературу і ціск газу, прырашчэнне ўнутранай энергіі і работу, выкананую газам.

13.36. Які аб'ём сціснутага двухатамнага газу трэба зрасходаваць для выканання работы 250 кДж, калі пры адыябатным расшырэнні аб'ём яго павялічваецца ў 2 разы пры пачатковым ціску 0,18 МПа?

13.37. Пры памяншэнні аб'ёму кіслароду ад  $V_1 = 20$  дм<sup>3</sup> да  $V_2 = 10$  дм<sup>3</sup> яго ціск узрос ад  $p_1 = 0,10$  МПа да  $p_2 = 0,25$  МПа. Якое прырашчэнне ўнутранай энергіі газу? .



13.38. Гелій масай 20 г, які змяшчаецца ў цыліндры пад поршнем, вельмі павольна пераводзяць з стану 1 ( $p_1 = 0,41$  МПа,  $V_1 = 32$  дм<sup>3</sup>) у стан 2 ( $p_2 = 1,6$  МПа,  $V_2 = 9,0$  дм<sup>3</sup>). Якой найбольшай тэмпературы дасягае газ пры гэтым працэсе, калі графік залежнасці ціску ад аб'ёму — прамая лінія (рыс. 13.4)?

13.39. Ідэальны газ пераводзяць з стану 1 у стан 3 з дапамогай ізабарнага і ізатэрмічнага працэсаў (гл. рыс. 6 да адказу 11.18). Дадатныя ці адмоўныя: работа  $A'$ , выкананая газам, і колькасць цеплыні  $Q$ , атрыманай газам, у кожным з зазначаных працэсаў?

13.40. У выніку адыябатнага расшырэння кіслароду масай 3,2 г, які знаходзіцца пры тэмпературы 20 °С, ціск паменшыўся ад 1,0 да 0,38 МПа. Вызначыць: 1) у колькі разоў павялічыўся аб'ём; 2) тэмпературу ў канцы працэсу; 3) якую колькасць цеплыні неабходна надаць газу пры пастаянным аб'ёме, для таго каб тэмпература зноў павысілася да 20 °С; 4) які пры гэтым устанавіцца ціск?

13.41. У цыліндры пад поршнем знаходзіцца двухатамны газ у колькасці 1 моль пры тэмпературы 27 °С. Спачатку газ расшыраецца адыябатна так, што аб'ём яго павялічваецца ў 5 разоў, а затым сціскаецца ізатэрмічна да першапачатковага аб'ёму. Вызначыць выкананую газам работу.

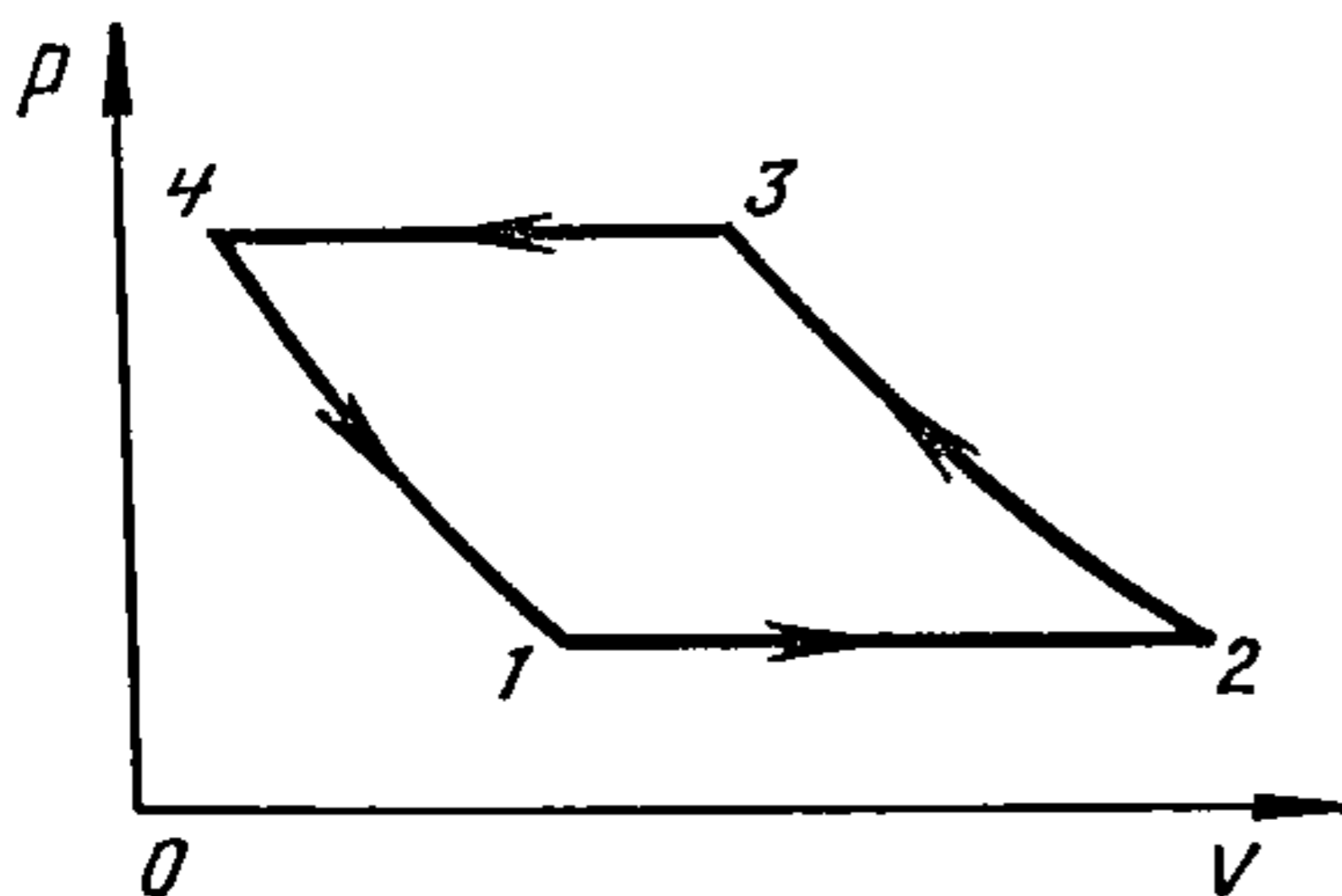
13.42. Паветра масай 0,50 кг ізатэрмічна сціскаюць ад 0,10 да 1,0 МПа, пры гэтым выконваецца работа 103 кДж. У канцы сціскання пры пастаянным ціску да паветра падводзіцца колькасць цеплыні, роўная адведзенай раней пры ізатэрмічным сцісканні. Вызначыць тэмпературу і аб'ём у канцы кожнага з гэтых працэсаў.

13.43. Ідэальны газ пераходзіць з стану 1 ( $p_1, V_1, T_1$ ) у стан 2 ( $p_2, V_2, T_2$ ). Затым з стану 2 газ павольна адыябатна пераходзіць у стан 3 ( $p_3, V_3, T_3$ ). Вядома, што пры пераходзе 2—3 газ выконвае работу, роўную колькасці цеплыні, перададзенай яму пры пераходзе 1—2. Паказаць, што  $T_3 = T_1$ . Начарціць працэсы 1—2 і 2—3 на дыяграме  $V, T$ .

13.44. Цыкл, адпаведны працэсу, які адбываецца з ідэальным газам некаторай масы, складаецца з дзвюх ізабар і дзвюх ізатэрм (рыс. 13.5).

Начарціць цыкл у каардынатах  $(T, p)$ ,  $(p, T)$  і  $(U, V)$  і высветліць, на якіх участках работа, выкананая газам,  $A' < 0$ , а на якіх  $A' > 0$ .

13.45. Ідэальны газ выконвае цыкл, які складаецца з дзвюх ізатэрм і дзвюх ізахор (рыс. 13.6). Начарціць гэты працэс у каардынатах  $(p, T)$ ,  $(p, T)$  і  $(U, V)$  і высветліць, як змяняецца



Рыс. 13.5



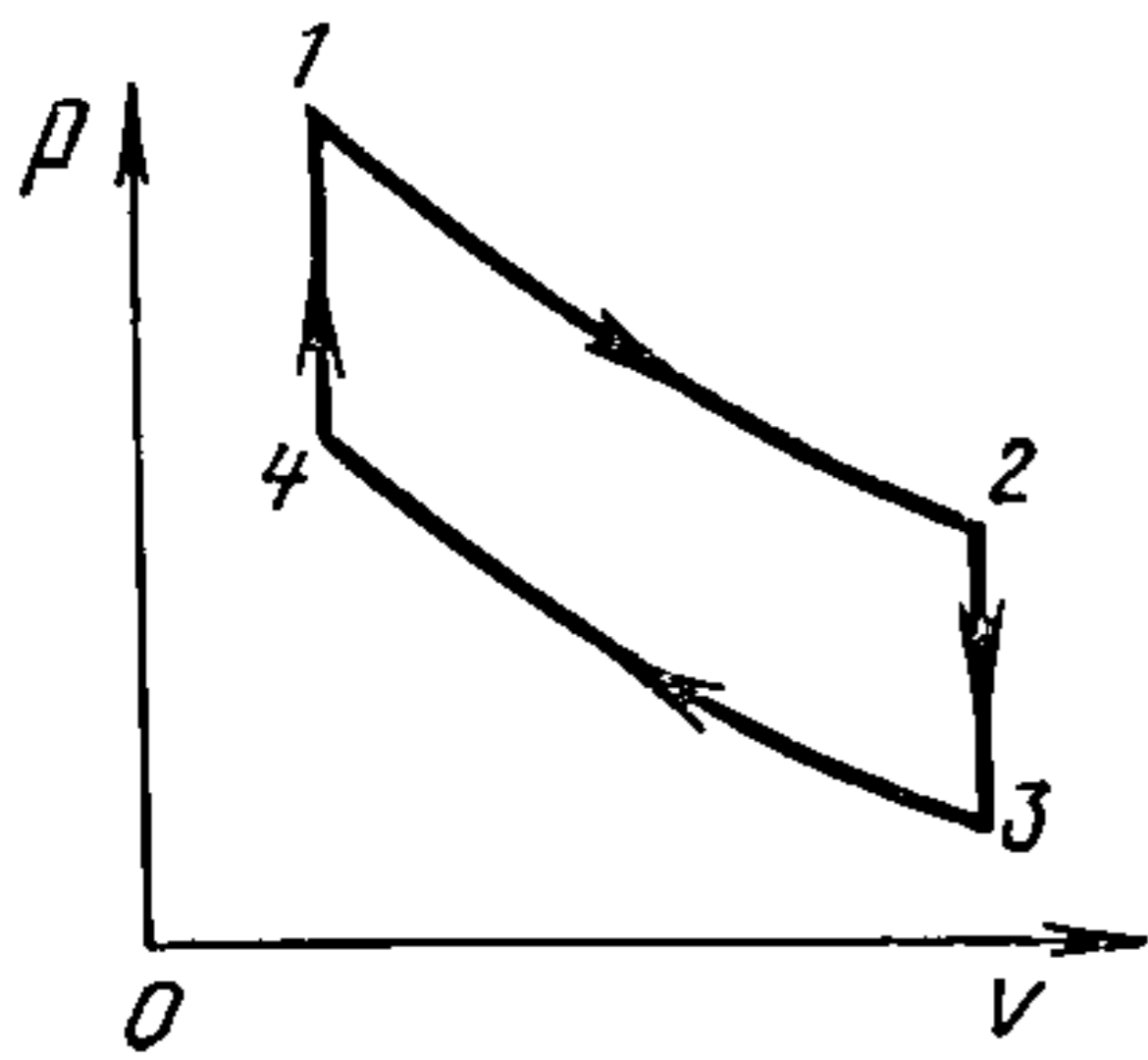


Рис.13.6

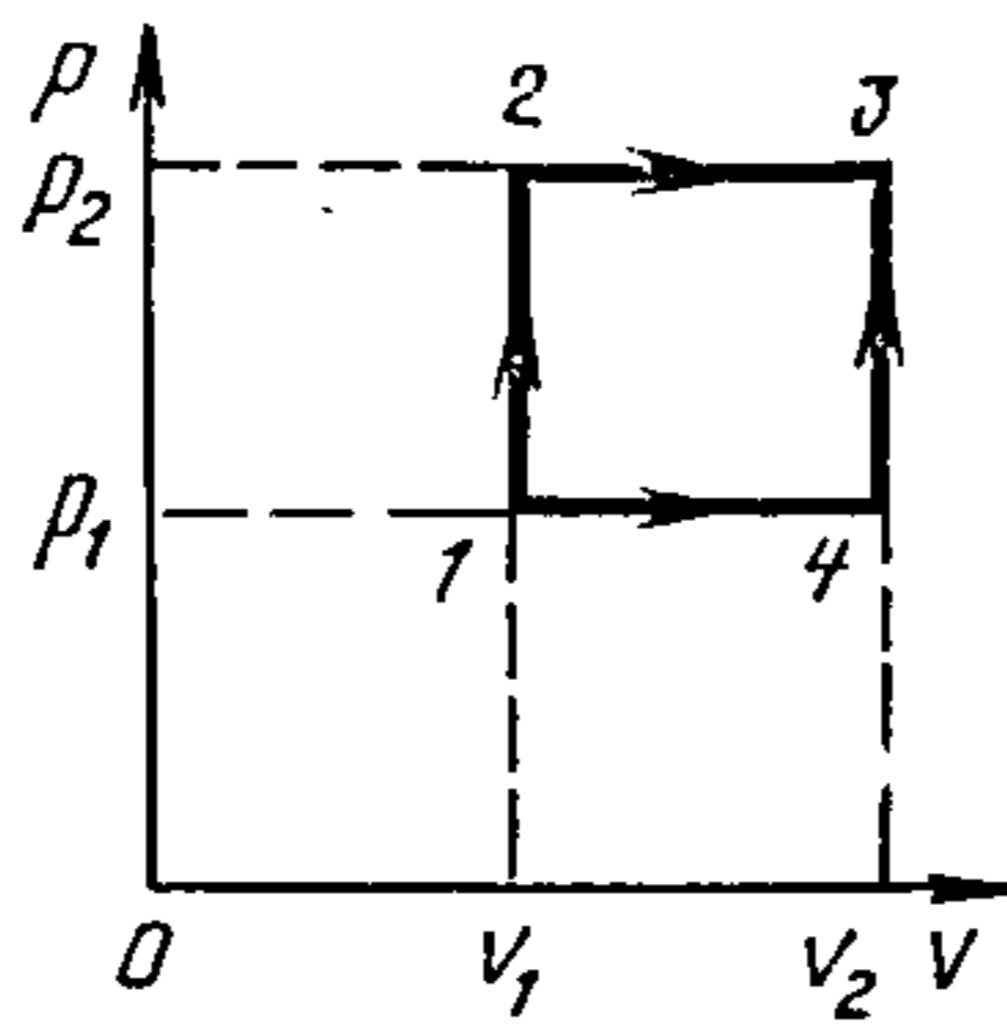


Рис.13.7

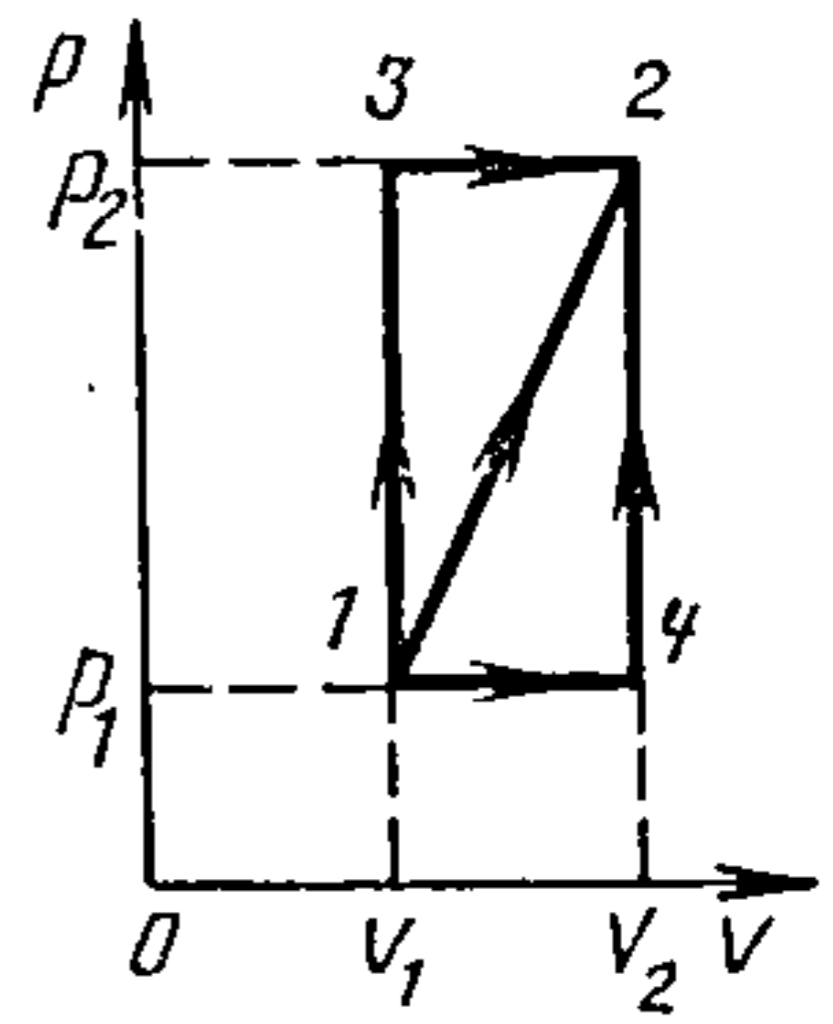


Рис.13.8

ўнутраная энергія газу на кожным участку.

13.46. Калі ідэальны газ выконвае працэс  $1-2-3$  (рыс. 13.7), то яму надаецца колькасць цеплыні  $Q$ . Якая колькасць цеплыні перадаецца газу ў працэсе  $1-4-3$ ?

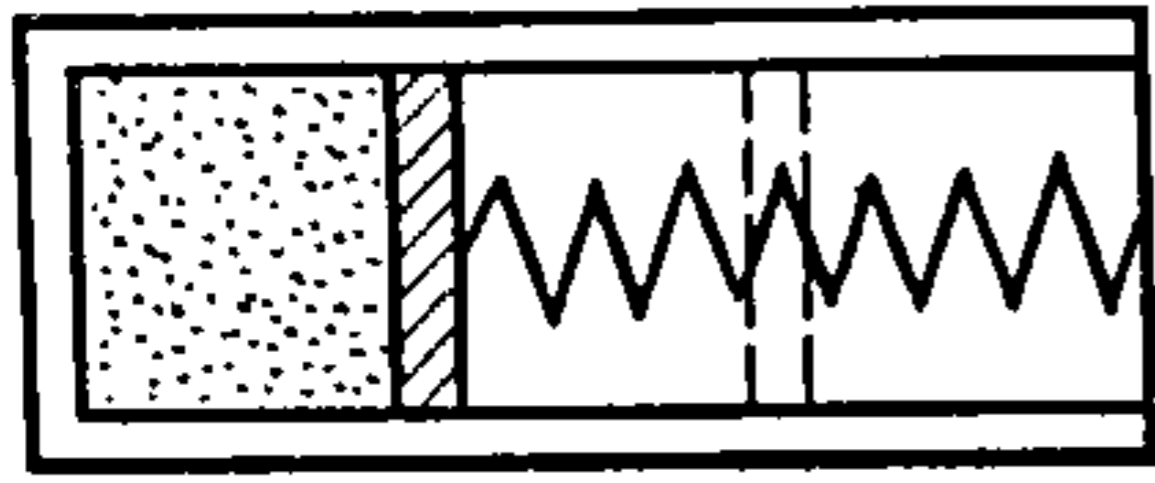
13.47. Трохатамны газ з жорсткімі (аб'ёмнымі) малекуламі аб'ёмам  $20 \text{ дм}^3$ , які знаходзіўся пад ціскам  $0,10 \text{ МПа}$ , пераведзены ў стан, пры якім яго аб'ём павялічыўся ў 2 разы, а ціск у 3 разы. Вызначыць колькасць цеплыні, неабходнай газу для гэтага пераходу, змяненне яго ўнутранай энергіі, а таксама работу, выкананую газам, пры ўмовах, што пераход адбываецца па шляху: 1)  $1-3-2$ ; 2)  $1-2$ ; 3)  $1-4-2$  (рыс. 13.8).

13.48. Газ аб'ёмам  $50 \text{ дм}^3$ , які знаходзіцца пад ціскам  $0,30 \text{ МПа}$ , ізахорна награвваюць да той пары, пакуль ціск яго павялічыцца ў 2 разы, пасля чаго газ ізатэрмічна расшыраюць да пачатковага ціску і нарэшце яго ахалоджваюць пры пастаянным ціску да пачатковага аб'ёму. Вызначыць работу, выкананую газам у кожным з гэтых працэсаў.

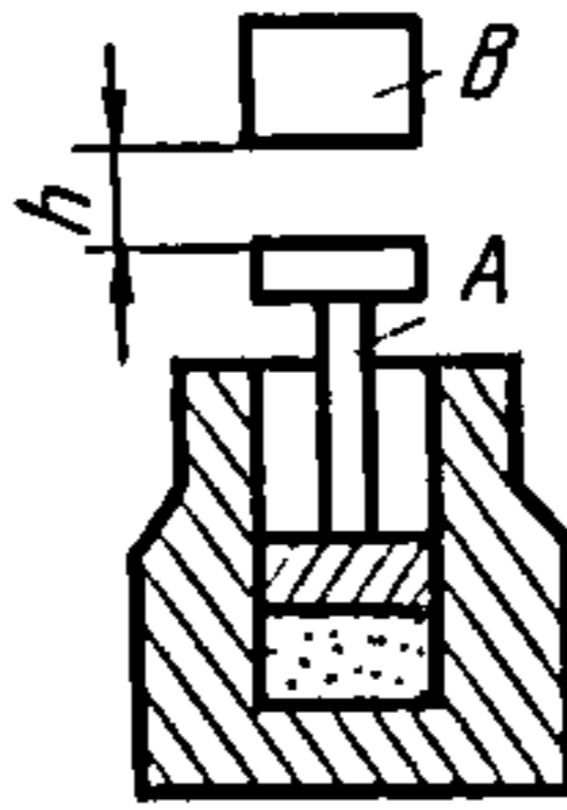
13.49. Валейбольны мяч масай  $m = 200 \text{ г}$  і аб'ёмам  $V = 8,0 \text{ дм}^3$  напампаваны да лішкавага ціску  $p = 20 \text{ кПа}$ . Затым ён быў падкінуты на вышыню  $h = 20 \text{ м}$  і пасля падзення на цвёрды грунт падскочыў амаль на тую ж вышыню. Ацаніць максімальную тэмпературу паветра ў мячы ў момант удару аб грунт. Тэмпература вонкавага паветра  $T = 300 \text{ К}$ .

13.50. У вертыкальным цыліндры знаходзіцца ідэальны аднаатамны газ у колькасці  $\nu$  моль. Цыліндр закрыты зверху поршнем масай  $m$  і плошчаю  $S$ . Спачатку поршань утрымліваўся нерухома, газ у цыліндры займаў аб'ём  $V_0$  і меў тэмпературу  $T_0$ . Затым поршань вызвалілі і пасля некалькіх ваганняў ён прыйшоў у стан спакою (усе сілы трэння, а таксама цеплаёмістасць поршня і цыліндру не ўлічваюць). Знайсці тэмпературу і аб'ём газу пры новым месцы знаходжання поршня. Уся сістэма цеплаізалявана. Атмасферны ціск роўны  $p_0$ .

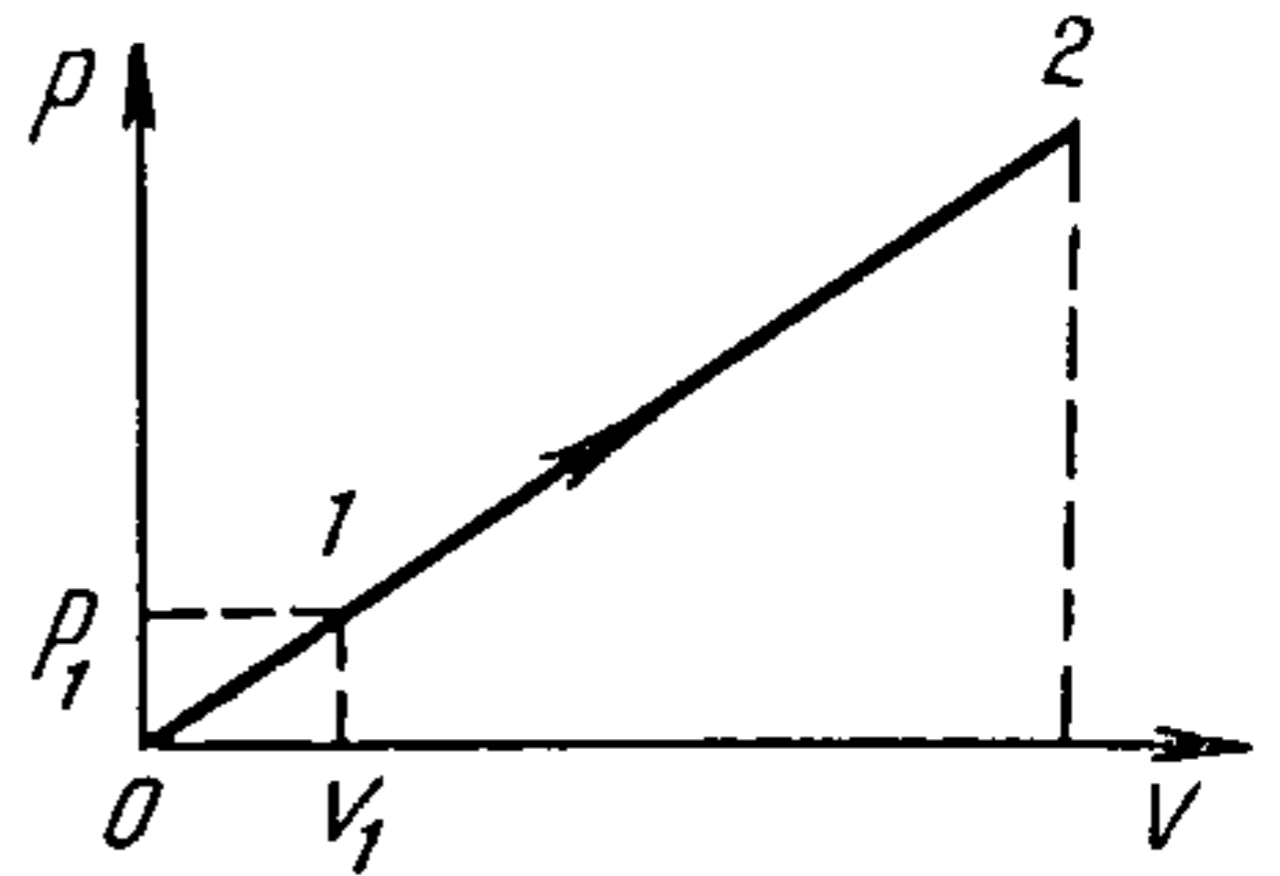
13.51. У размешчаным гарызантальна цыліндры з аднаго боку ад замацаванага поршня знаходзіцца ідэальны газ у колькасці 1 моль. У другой частцы цыліндру — вакуум. Спружына, размешчаная паміж поршнем і сценкай цыліндру (рыс. 13.9), знаходзіцца ў недефармаваным стане. Цыліндр цеплаізаляваны ад навакольнага асяроддзя. Поршань вызваля-



Рыс.13.9



Рыс.13.10



Рыс.13.11

юць, і пасля ўстанаўлення раўнавагі аб'ём, займаемы газам, павялічваецца ўдвая. Як зменіцца тэмпература газу і яго ціск? Цеплаёмістасць цыліндра, поршня і спружыны не ўлічваць.

13.52. Цыліндрычнае паглыбленне зачынена поршнем  $A$ , што свабодна рухаецца. Пад ім засталася камера ёмістасцю  $38\text{ см}^3$ , запоўненая паветрам пры нармальным умовах (рыс. 13.10). На поршань падае груз  $B$  масай  $1,5\text{ кг}$  з вышыні  $0,50\text{ м}$ . Вызначыць тэмпературу паветра пасля сціскання яго ўпаўшым грузам, калі лічыць сцісканне адыябатным працэсам.

13.53. Нерухомы балон змяшчае вуглякіслы газ аб'ёмам  $20\text{ дм}^3$  пад ціскам  $3,0\text{ МПа}$  пры тэмпературы  $27^\circ\text{ С}$ . З якой скорасцю пачне рухацца балон, калі адчыніць выпускны вентэль? Маса балона  $20\text{ кг}$ .

13.54. У выніку палітрапічнага сціскання ад  $0,100$  да  $0,800\text{ МПа}$  аб'ём  $18,0\text{ м}^3$  паветра паменшыўся ў  $6$  разоў. Вызначыць паказальнік палітропы і работу, выкананую газам пры сцісканні.

13.55. Азот масай  $1,0\text{ кг}$ , які знаходзіцца пры тэмпературы  $700^\circ\text{ С}$  і ціску  $2,5\text{ МПа}$ , палітрапічна расшыраецца да ціску  $0,10\text{ МПа}$ . Вызначыць тэмпературу ў канцы працэсу і работу, выкананую газам. Паказальнік палітропы  $n = 1,18$ .

13.56. Ідэальны двухатамны газ у колькасці  $1$  моль расшыраецца па палітропе з паказальнікам  $n = 1,2$ , пры гэтым тэмпература газу памяншаецца на  $1,0\text{ К}$ . Вызначыць: 1) малярную цеплаёмістасць газу пры гэтым працэсе; 2) колькасць цеплыні, атрыманай газам; 3) работу, выкананую газам.

13.57. Газ выконвае палітрапічны працэс (рыс. 13.11), у выніку якога аб'ём яго ўзрос у  $5$  разоў. Пачатковы аб'ём газу  $V_1$ , пачатковы ціск  $p_1$ . Вызначыць: 1) паказальнік палітропы  $n$ ; 2) малярную цеплаёмістасць  $C$  газу; 3) прырашчэнне ўнутранай энергіі  $\Delta U$ ; 4) работу  $A'$ , выкананую газам.

### Элементы газадынамікі

13.58. Вызначыць максімальную скорасць паветра пры адыябатным выцяканні з пасудзіны вялікага аб'ёму ў вакуум. Тэмпература паветра ў пасудзіне роўная  $293\text{ К}$ .

13.59. Тэмпература рухомага паветра роўная  $273\text{ К}$ . Вызначыць тэмпе-



ратуру тармажэння для патоку паветра, скорасць якога 500 м/с. Тэмпературай тармажэння газавога патоку называецца тэмпература, якую меў бы газ пасля адыябатнага тармажэння да поўнага спынення.

13.60. Пры якой тэмпературы можна атрымаць атамы ксенону з скорасцю  $v = 1,20$  км/с пры адыябатным выцяканні струменя газу ў вакуум? Малярная маса ксенону  $M = 0,131$  кг/моль.

13.61. Знайсці скорасць адыябатнага выцякання струменя ідэальнага газу з пасудзіны праз малую адтуліну ў вакуум. Скорасць распаўсюджвання гуку ў газе  $v_r$ .

13.62. Вызначыць тэмпературу і скорасць струменя гелію, які выцякае адыябатна з балона, пры ціску  $p_2 = 0,20$  МПа. Ціск і тэмпература ў балоне адпаведна роўныя  $p_1 = 2,0$  МПа і  $T_1 = 27^\circ \text{C}$ .

13.63. Адыябатнае выцяканне ў вакуум прадуктаў згарання паліва ў рухавіку касмічнай ракеты адбываецца пры тэмпературы  $3,00 \cdot 10^3$  К. Паказальнік адыябаты  $\gamma = 1,2$ . Сярэдняя малярная маса прадуктаў згарання  $M = 0,030$  кг/моль. Вызначыць, у колькі разоў стартавая маса ракеты  $m_0$  павінна перавышаць яе канечную масу  $m$ , каб ракета магла дасягнуць першай касмічнай скорасці  $v_1$ . Уплыў сілы цяжару і трэння аб паветра на ўчастку паскарэння ракеты не ўлічваць.

13.64. Скорасць адыябатнага выцякання прадуктаў згарання з сапла касмічнай ракеты роўная 2,0 км/с, тэмпература 900 К. Вызначыць тэмпературу ў камеры згарання і максімальны гранічны ККДз. Лічыць, што паліва поўнасцю згарае і з сапла выцякае вуглякіслы газ.

13.65. Касмічны карабель рухаецца з скорасцю  $v$  у ідэальным газе, тэмпература якога  $T$ . У якім пункце на паверхні карабля тэмпература газу будзе максімальнай і чаму яна роўная?

13.66. У камеру згарання рэактыўнага рухавіка паступае за 1 с вадарод масай  $m$  і неабходная для яго поўнага згарання колькасць кіслароду. Плошча сячэння выхадной адтуліны сапла рухавіка  $S$ , ціск у гэтым сячэнні  $p$ , абсалютная тэмпература  $T$ . Вызначыць сілу цягі рухавіка.

13.67. Вызначыць сілу цягі рэактыўнага рухавіка, які працуе на вадародзе і кіслародзе. Расход вадароду 24,0 кг/с. Рознасць тэмператур у камеры згарання і ў струмені адыябатна выцякаючага газу  $4,80 \cdot 10^3$  К.

## § 14. ДРУГІ ЗАКОН ТЭРМАДЫНАМІКІ

Каэфіцыент карыснага дзеяння (ККДз) цеплавой машыны

$$\eta = (Q_1 - Q_2) / Q_1,$$

дзе  $Q_1$  — колькасць цеплыні, атрыманай рабочым целам ад награвальніка;  $Q_2$  — колькасць цеплыні, перададзенай рабочым целам халадзільніку.

ККДз ідэальнага цыкла Карно

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1,$$

дзе  $T_1$  — тэмпература награвальніка;  $T_2$  — тэмпература халадзільніка.



Халадзільны каэфіцыент халадзільнай машыны

$$\epsilon = Q'_2 / A,$$

дзе  $Q'_2$  — колькасць цеплыні, аднятай ад ахалоджваемага цела за цыкл;  $A$  — работа, выкананая над газам за цыкл.

Прырашчэнне энтрапіі пры пераходзе сістэмы з стану 1 у стан 2

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

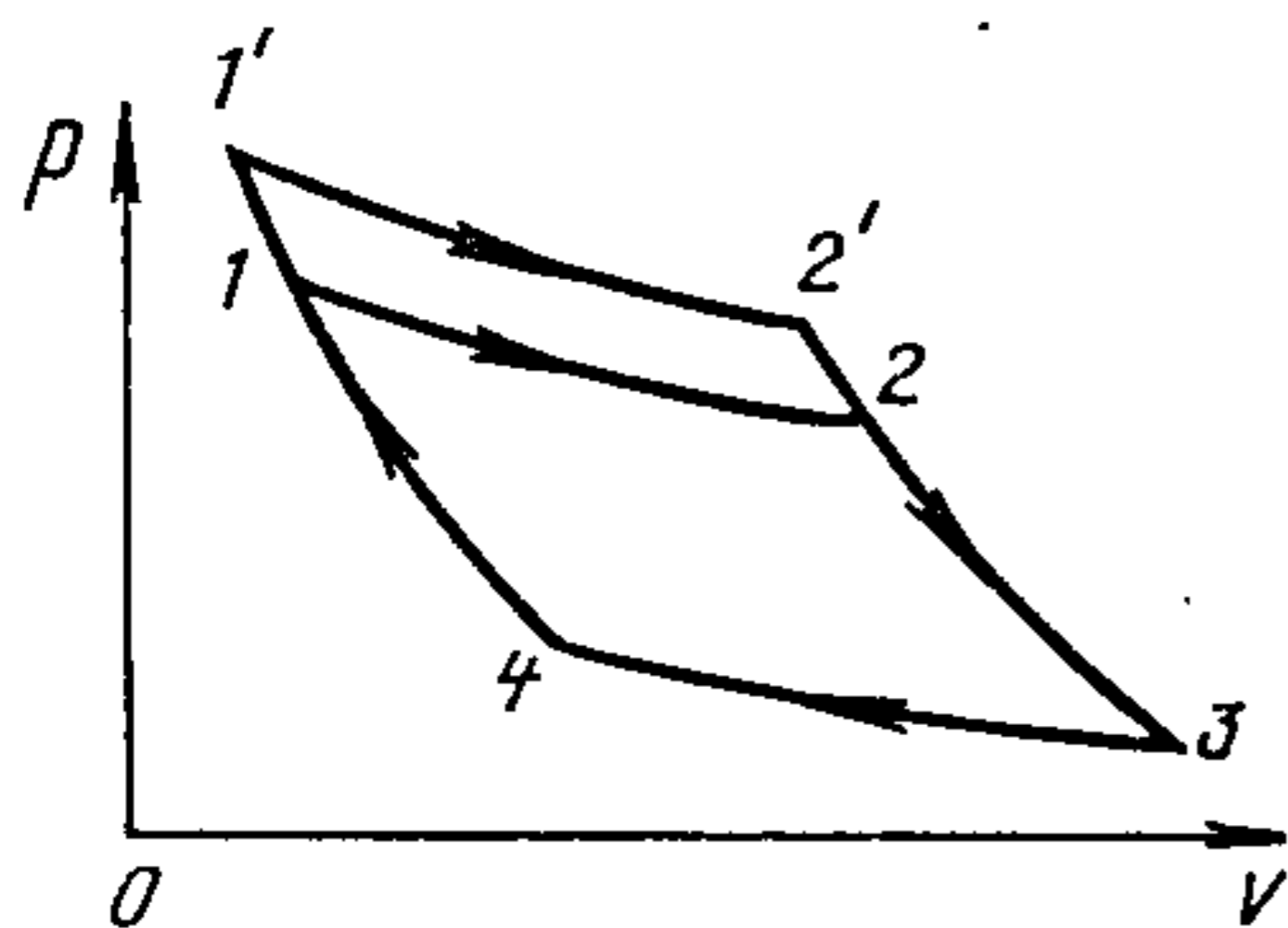
Тэрмадынамічная імавернасць  $\Omega$  (статыстычная вага) і энтрапія  $S$  звязаны суадносінай

$$S = k \ln \Omega.$$

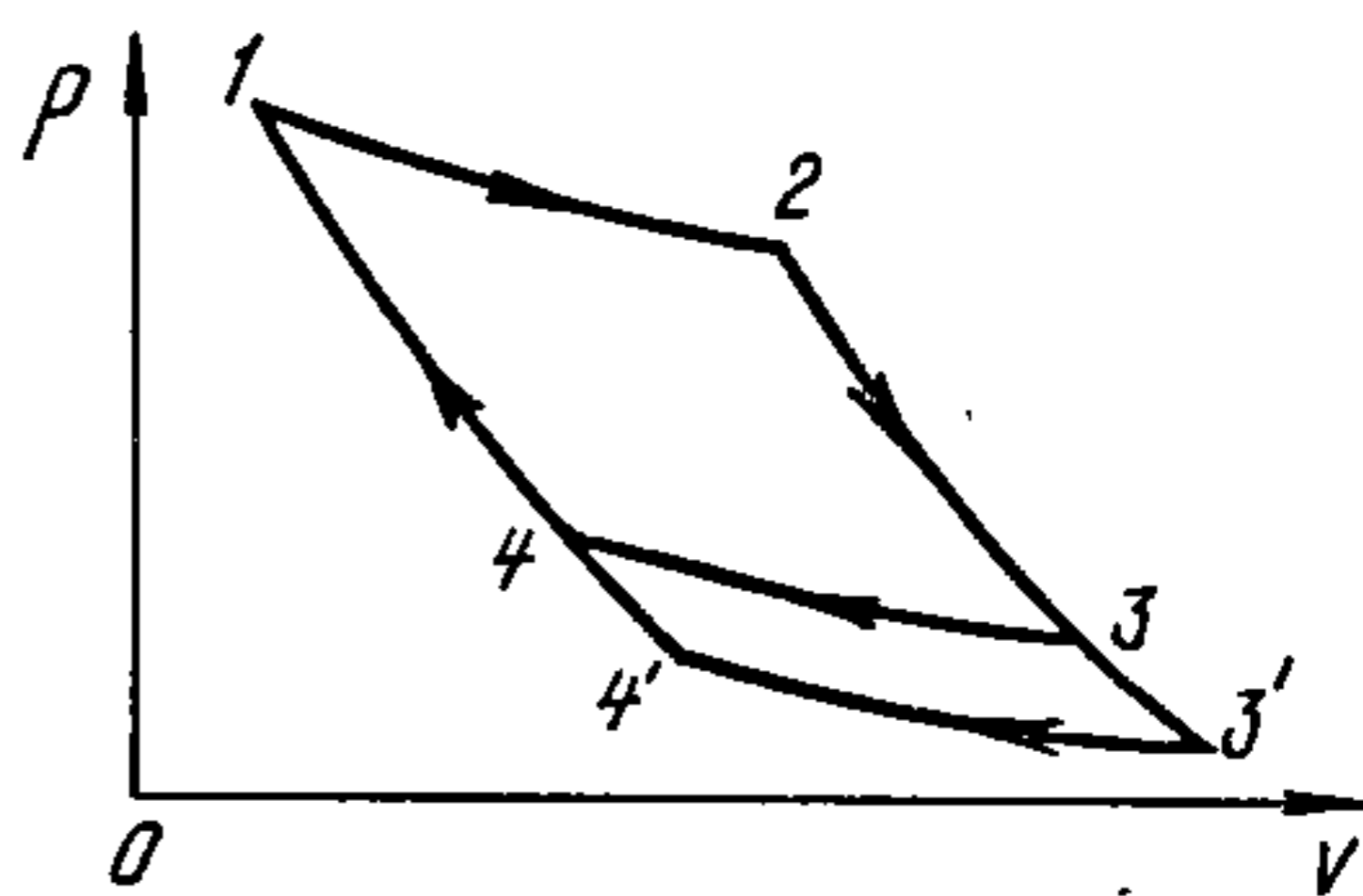
## Цеплавая рухавікі і халадзільныя машыны

14.1. На рыс. 14.1 дадзены дыяграмы двух цыклаў Карно:  $1-2-3-4-1$  і  $1'-2'-3-4-1'$ . У якім з цыклаў машына будзе мець большы ККДз?

14.2. На рыс. 14.2 дадзены дыяграмы двух цыклаў Карно:  $1-2-3-4-1$  і  $1-2-3'-4'-1$ . У якім з цыклаў машына будзе мець большы ККДз?



Рыс.14.1



Рыс.14.2

14.3. У выніку кругавога працэсу газ выканаў работу 2,0 кДж і перадаў халадзільніку колькасць цеплыні 8,4 кДж. Вызначыць ККДз цыклу.

14.4. Газ, які выконвае цыкл Карно,  $3/4$  цеплыні, атрыманай ад награвальніка, аддае халадзільніку. Тэмпература халадзільніка  $0^\circ \text{C}$ . Вызначыць тэмпературу награвальніка.

14.5. Газ выконвае цыкл Карно. Абсалютная тэмпература награвальніка ў 3 разы вышэй за абсалютную тэмпературу халадзільніка. Якую долю цеплыні, атрыманай за адзін цыкл ад награвальніка, газ аддае халадзільніку?

14.6. Ідэальная цеплавая машына, якая працуе па цыклу Карно, мае тэмпературу награвальніка  $227^\circ \text{C}$ , тэмпературу халадзільніка  $127^\circ \text{C}$ . У колькі разоў трэба павялічыць тэмпературу награвальніка, каб ККДз машыны павялічыўся ў 3 разы?

14.7. Тэмпература награвальніка цеплавой машыны, якая працуе па цыклу Карно,  $427^\circ \text{C}$ , халадзільніка  $227^\circ \text{C}$ , прычым халадзільнік гэтай цеплавой машыны служыць награвальнікам другой цеплавой машыны. У якой з машын ККДз большы і ў колькі разоў, калі рознасць тэмпера-

тур нагрывальніка і халадзільніка ў абедзвюх машын аднолькавая?

14.8. ККДз паравой машыны складае 50 % ККДз ідэальнай цеплавой машыны, якая працуе па цыкле Карно ў тым жа інтэрвале тэмператур. Тэмпература пары, якая паступае з катла ў паравую машыну,  $227^{\circ}\text{C}$ , тэмпература ў кандэнсары  $77^{\circ}\text{C}$ . Вызначыць магутнасць паравой машыны, калі яна за 1 гадз. спажывае вугаль масай 200 кг з удзельнай цеплынёй згарання 31 МДж/кг.

14.9. Цеплавую машыну, якая працуе па цыкле Карно з ККДз  $\eta = 20\%$ , скарыстоўваюць пры тых жа ўмовах як халадзільную машыну. Знайсці яе халадзільны каэфіцыент.

14.10. Якая патрэбна работа знешніх сіл у ідэальнай халадзільнай машыне, якая працуе па адваротнаму цыкле Карно, каб адняць у халадзільніка, тэмпература якога  $-10^{\circ}\text{C}$ , 100 кДж цеплыні? Тэмпература ахалоджваемай вады  $10^{\circ}\text{C}$ .

14.11. У ідэальнай халадзільнай машыне, што працуе па адваротнаму цыкле Карно, выконваецца перанос цеплыні ад цела з тэмпературай  $-20^{\circ}\text{C}$  да вады, якая мае тэмпературу  $10^{\circ}\text{C}$ . Вызначыць, якая колькасць цеплыні будзе аднята ад ахалоджваемага цела за адзін цыкл, калі вядома, што дадзеная халадзільная машына прыводзіцца ў дзеянне з дапамогай цеплавой машыны, якая працуе ў інтэрвале тэмператур  $202-107^{\circ}\text{C}$  і перадае халадзільніку за кожны цыкл 504 кДж цеплыні.

14.12. Халадзільнік магутнасцю  $P$  за час  $\tau$  ператварыў у лёд  $n$  літраў вады, якая першапачаткова мела тэмпературу  $t^{\circ}\text{C}$ . Якая колькасць цеплыні вылучылася за гэты час?

14.13. Хатні халадзільнік спажывае ток сярэдняй магутнасцю 40 Вт. Якая колькасць цеплыні вылучаецца ў пакоі за суткі, калі халадзільны каэфіцыент  $\epsilon = 9$ ?

14.14. Вылічыць ККДз цыкла Карно, які выконваецца трохатамным газам, што складаецца з жорсткіх (аб'ёмных) малекул, калі пры адыябатычным расшырэнні аб'ём яго павялічваецца ад 6 да  $7\text{ дм}^3$ .

14.15. Двухатамны газ выконвае цыкл Карно. Вызначыць ККДз цыкла, калі вядома, што на кожны моль гэтага газу пры яго адыябатычным сцісканні затрачваецца работа 2,0 кДж. Тэмпература нагрывальніка  $127^{\circ}\text{C}$ .

14.16. Найменшы аб'ём газу, які выконвае цыкл Карно,  $12\text{ дм}^3$ . Вызначыць найбольшы аб'ём, калі аб'ём газу ў канцы ізатэрмічнага расшырэння  $60\text{ дм}^3$ , а ў канцы ізатэрмічнага сціскання —  $19\text{ дм}^3$ .

14.17. Газ, які выконвае цыкл Карно з ККДз 25 %, пры ізатэрмічным расшырэнні выконвае работу 240 Дж. Якая работа выконваецца газам пры ізатэрмічным сцісканні?

14.18. На рыс. 14.3 паказаны дыяграмы  $V, T$  двух кругавых працэсаў. У якім з іх газ выконвае большую работу: у працэсе  $1-2-3-1$  ці ў працэсе  $1-3-4-1$ ?

14.19. Двухатамны газ выконвае цыкл Карно, прычым пры



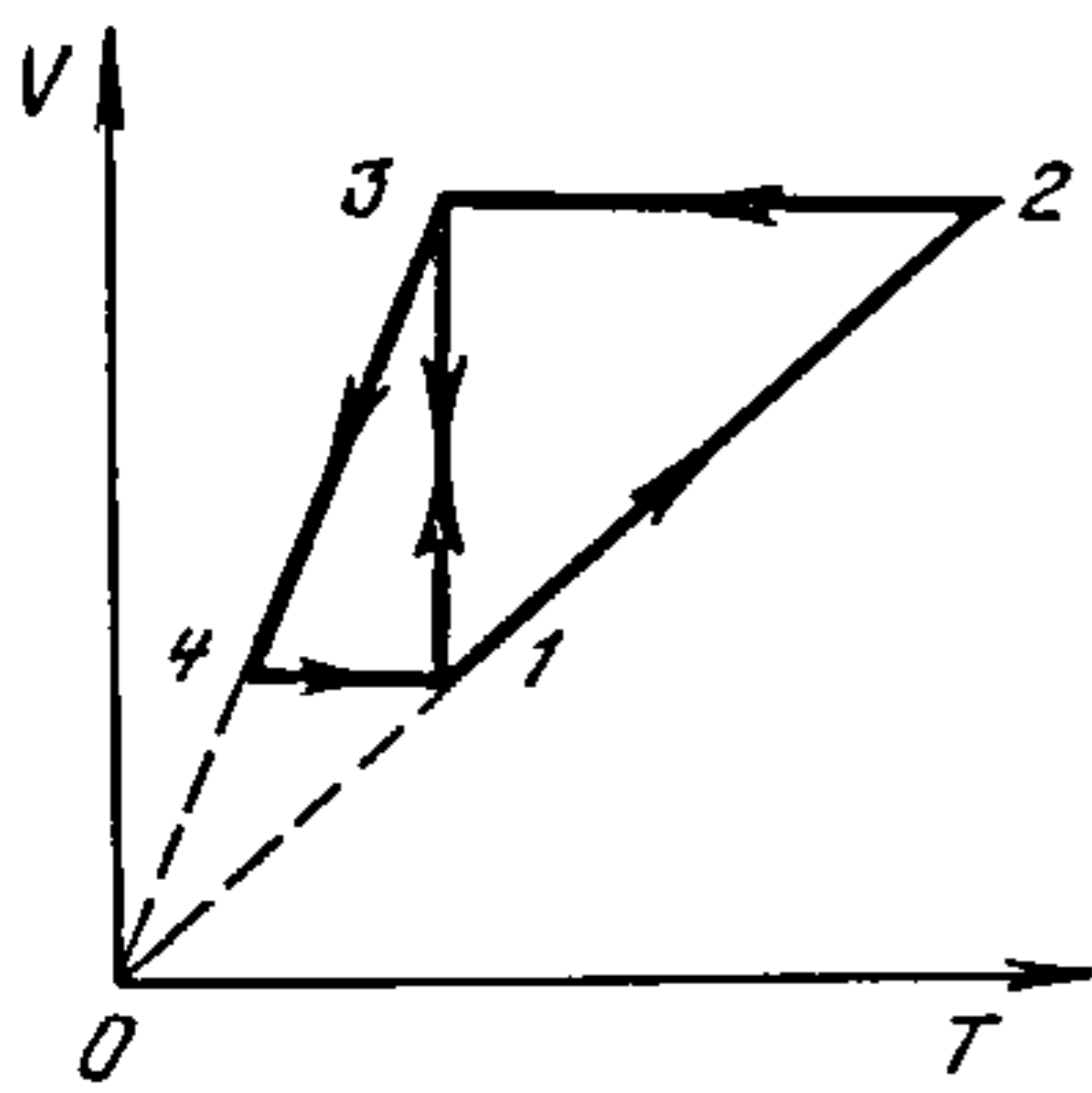


Рис.14.3

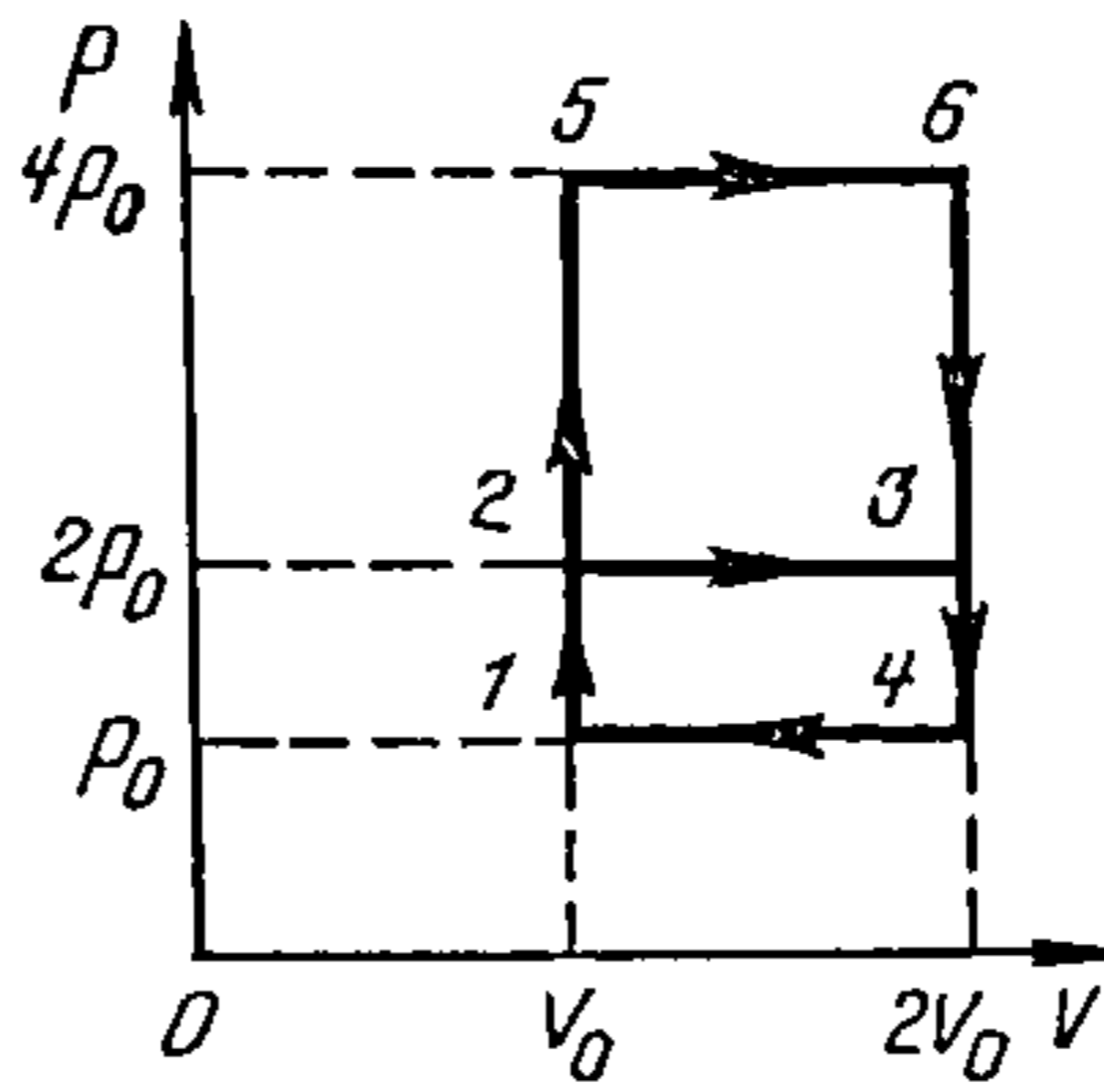


Рис.14.4

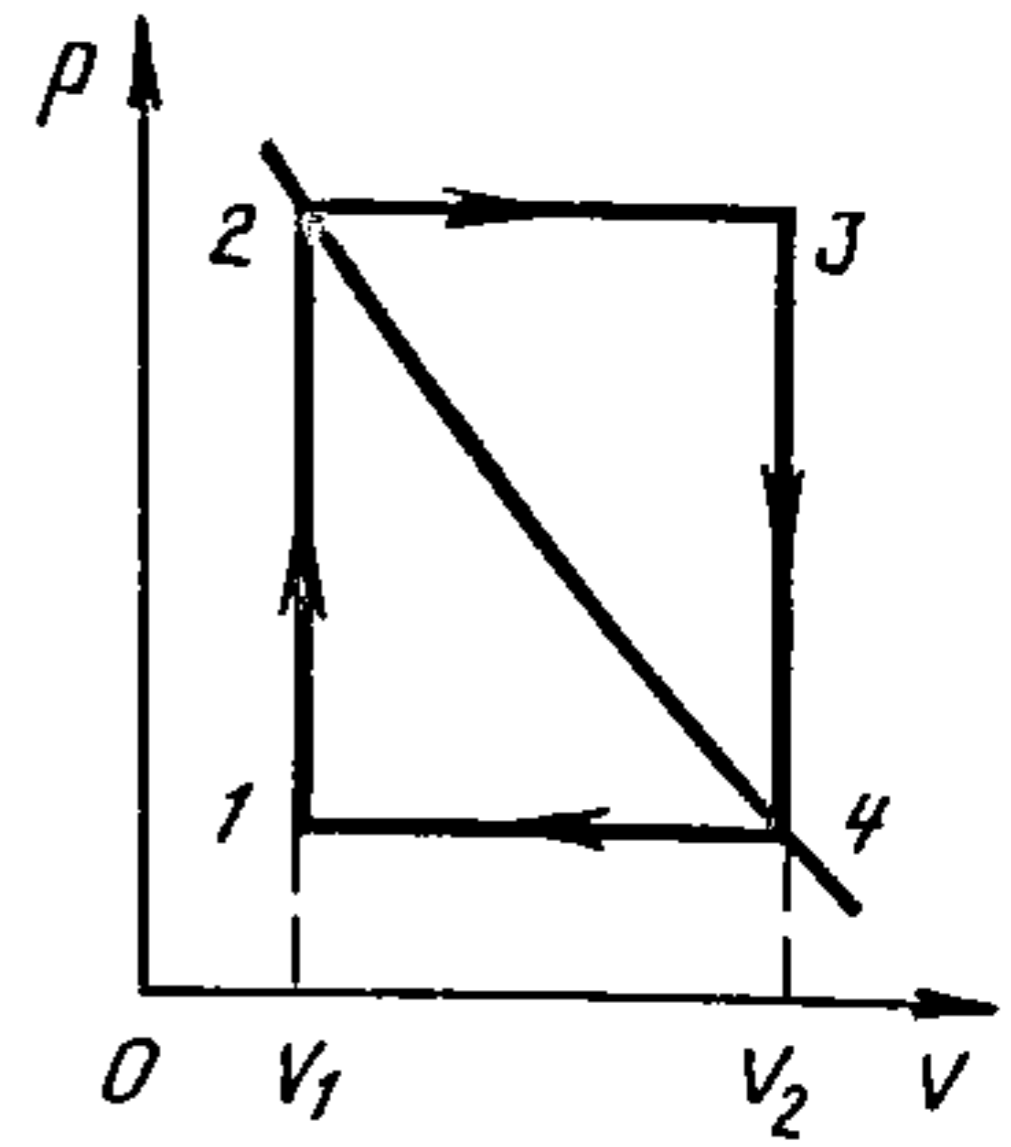


Рис.14.5

ізатэрмічным расшырэнні яго аб'ём павялічваецца ў 2 разы, а пры далейшым адыябатным расшырэнні ён выконвае работу 300 кДж. Вызначыць работу, якую выконвае газ за адзін цыкл.

14.20. На рис. 14.4 паказаны два замкнутыя тэрмадынамічныя цыклы, якія здзяйсняюцца з ідэальным аднаатамным газам:  $1-2-3-4-1$  і  $1-5-6-4-1$ . У якога з цыклаў ККДз вышэй і колькі разоў?

14.21. Ідэальны газ у колькасці 1 моль выконвае цыкл Карно, які складаецца з дзвюх ізахор і дзвюх ізабар (рис. 14.5). Тэмпература газаў у пунктах 1 і 3 роўная адпаведна  $T_1$  і  $T_3$ . Вызначыць работу, якую выконвае газ за цыкл, калі вядома, што пункты 2 і 4 ляжаць на адной ізатэрме.

14.22. Ідэальны двухатамны газ выконвае цыкл, які складаецца з дзвюх ізахор і дзвюх ізабар, прычым найбольшы ціск у 3 разы большы, чым найменшы, а найбольшы аб'ём у 5 разоў большы, чым найменшы. Вызначыць ККДз цыкла.

14.23. Паветра масай 1,0 кг выконвае цыкл, які складаецца з дзвюх ізахор і дзвюх ізабар (рис. 14.6). Пачатковы аб'ём газу  $80 \text{ дм}^3$ , ціск змяняецца ад 1,2 да 1,4 МПа, тэмпература  $t_3 = 150^\circ \text{ С}$ . Вызначыць: 1) каардынаты перасячэння ізахор і ізабар; 2) работу, выкананую газам за адзін цыкл; 3) колькасць цеплыні, атрыманай ад награвальніка за цыкл; 4) ККДз цыкла; 5) які ККДз меў бы цыкл Карно, ізатэрмы якога адпавядалі б найбольшай і найменшай тэмпературам разглядаемага цыкла.

14.24. Ідэальны трохатамны газ з жорсткіх (аб'ёмных) малекул награвецца пры пастаянным аб'ёме так, што яго ціск узрастае ў 2 разы. Пасля гэтага газ ізатэрмічна расшыраецца да пачатковага ціску і затым ізабарна сціскаецца да пачатковага аб'ёму. Вызначыць ККДз цыкла.

14.25. Ідэальны трохатамны газ з жорсткімі (аб'ёмнымі) малекуламі награвецца пры пастаянным аб'ёме так, што яго ціск узрастае ў 2 разы. Пасля гэтага газ адыябатна расшыраецца да пачатковага ціску і затым ізабарна сціскаецца да пачатковага аб'ёму. Вызначыць ККДз цыкла, які выконваецца газам.

14.26. На рис. 14.7 паказаны дыяграмы двух цыклаў  $1-2-3-4-1$  і  $1-5-6-7-1$ , якія складаюцца з дзвюх ізахор і дзвюх адыябат. У абодвух



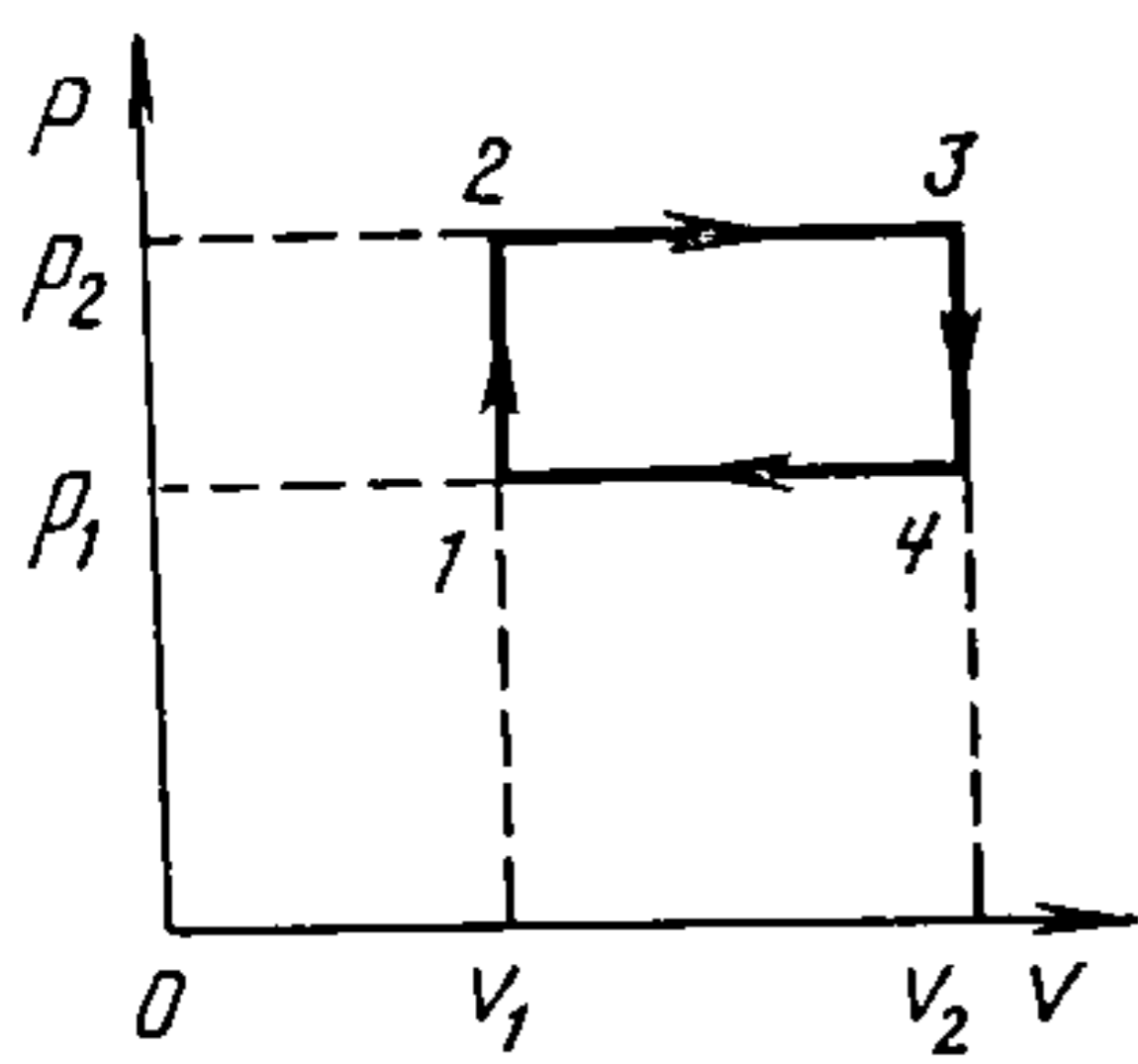


Рис.14.6

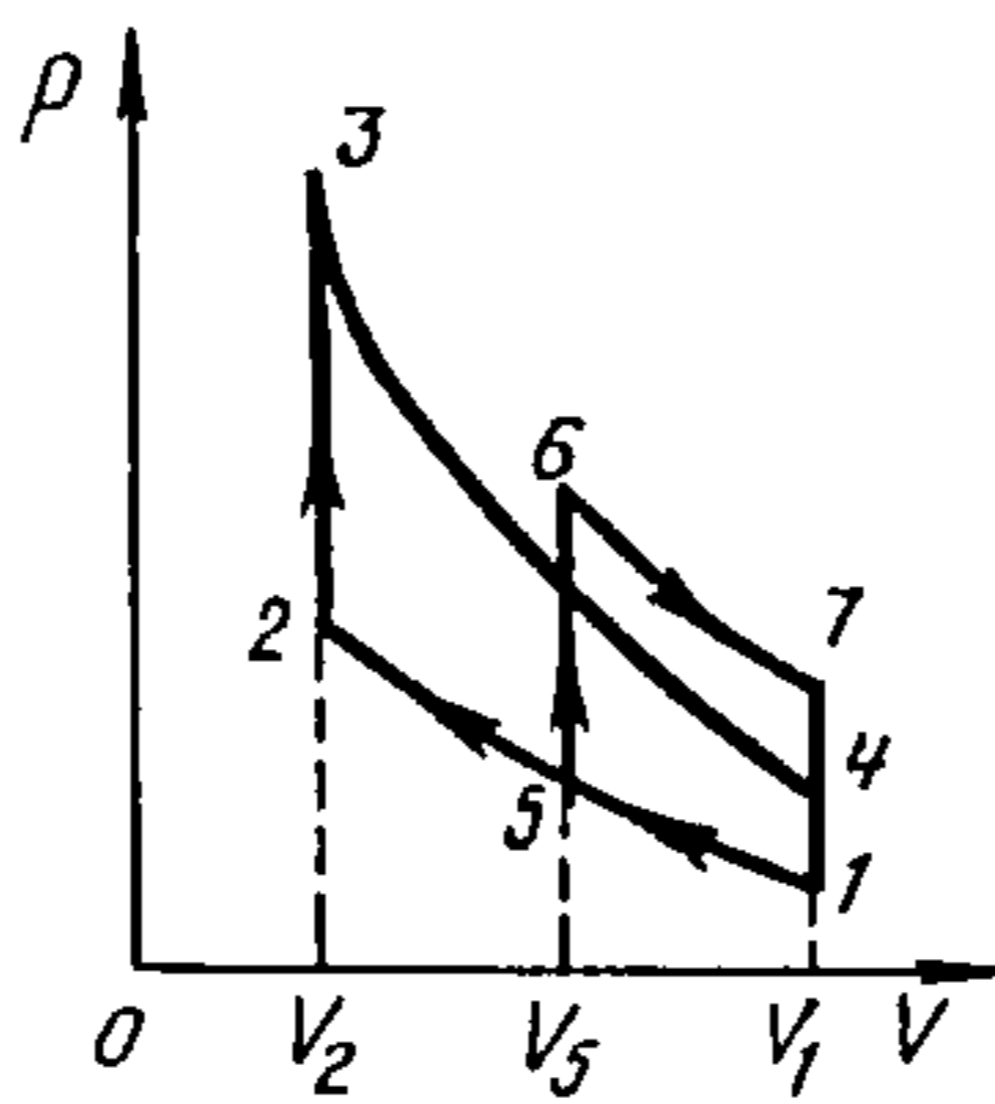


Рис.14.7

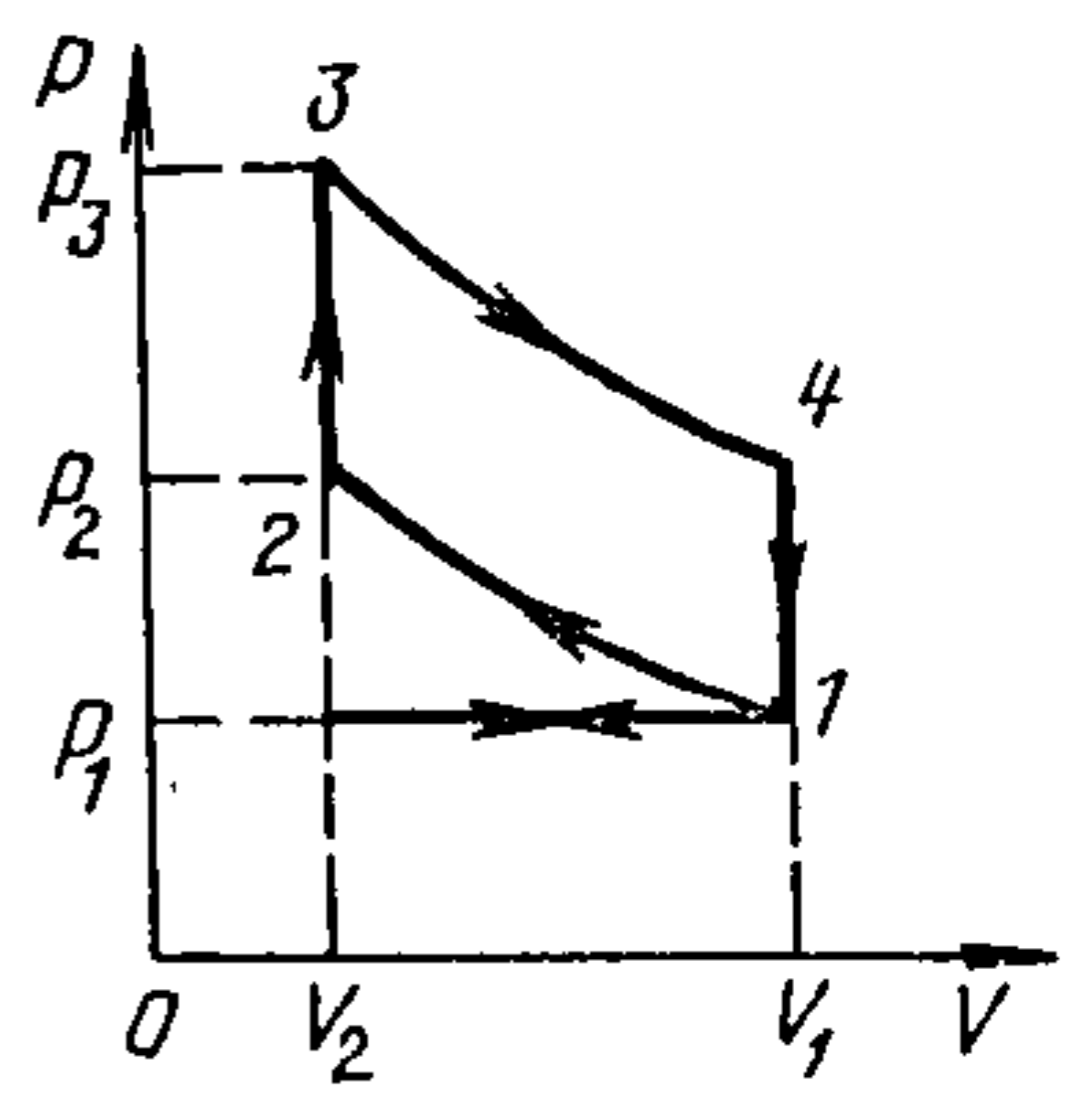


Рис.14.8

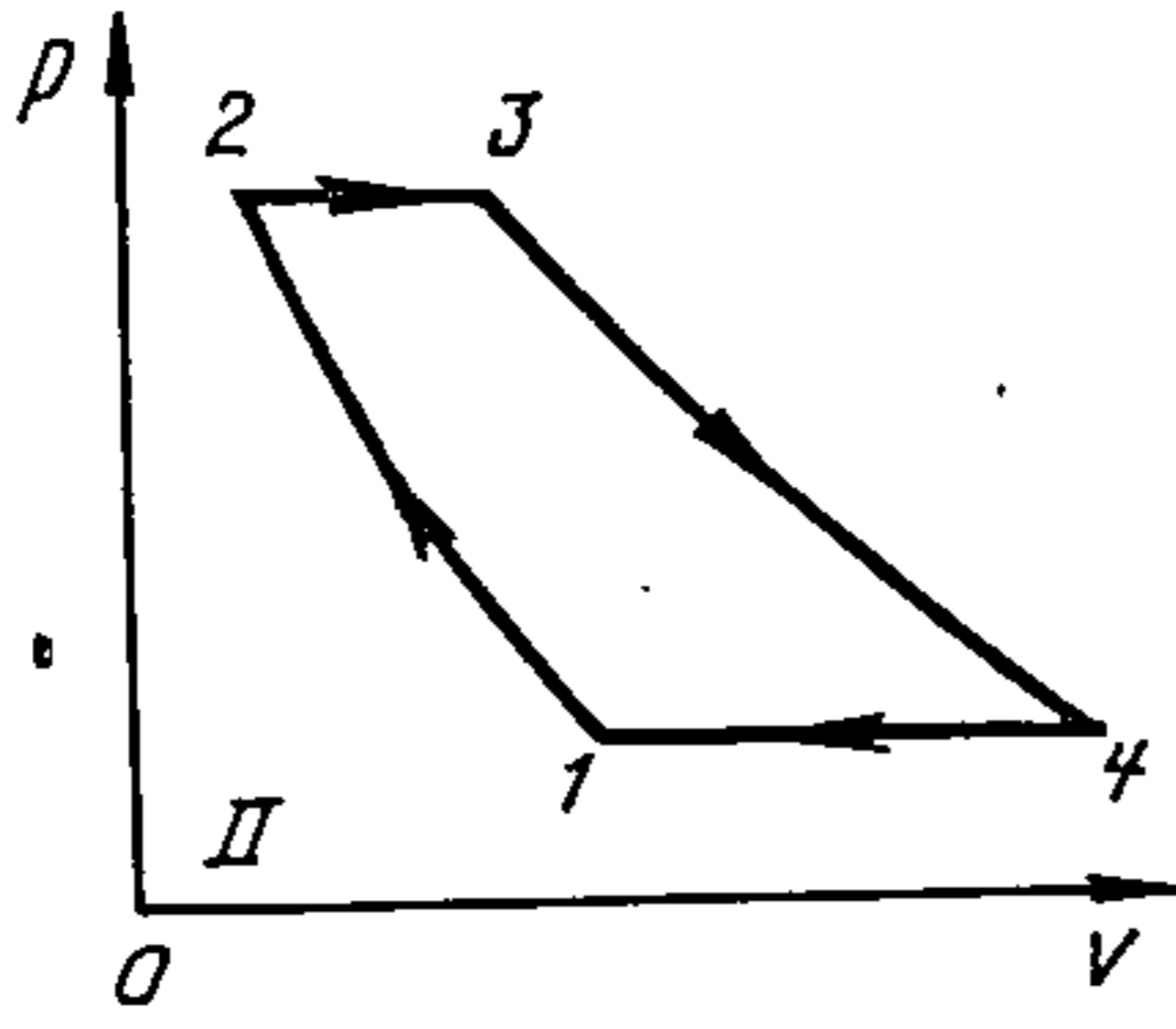
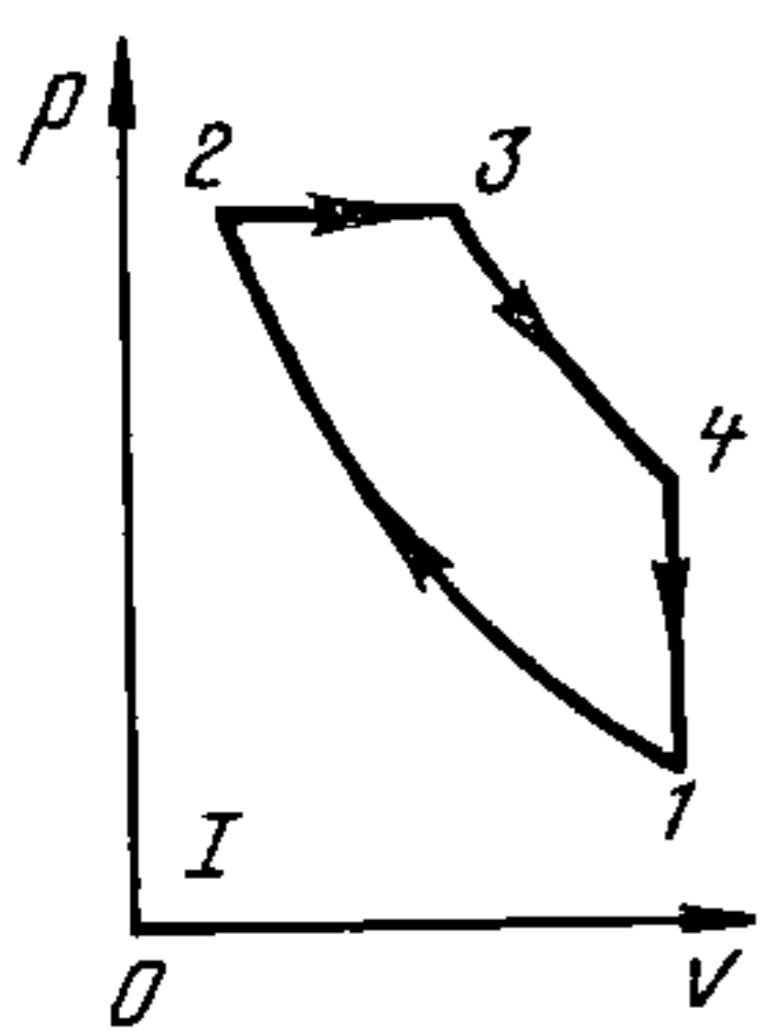


Рис.14.9

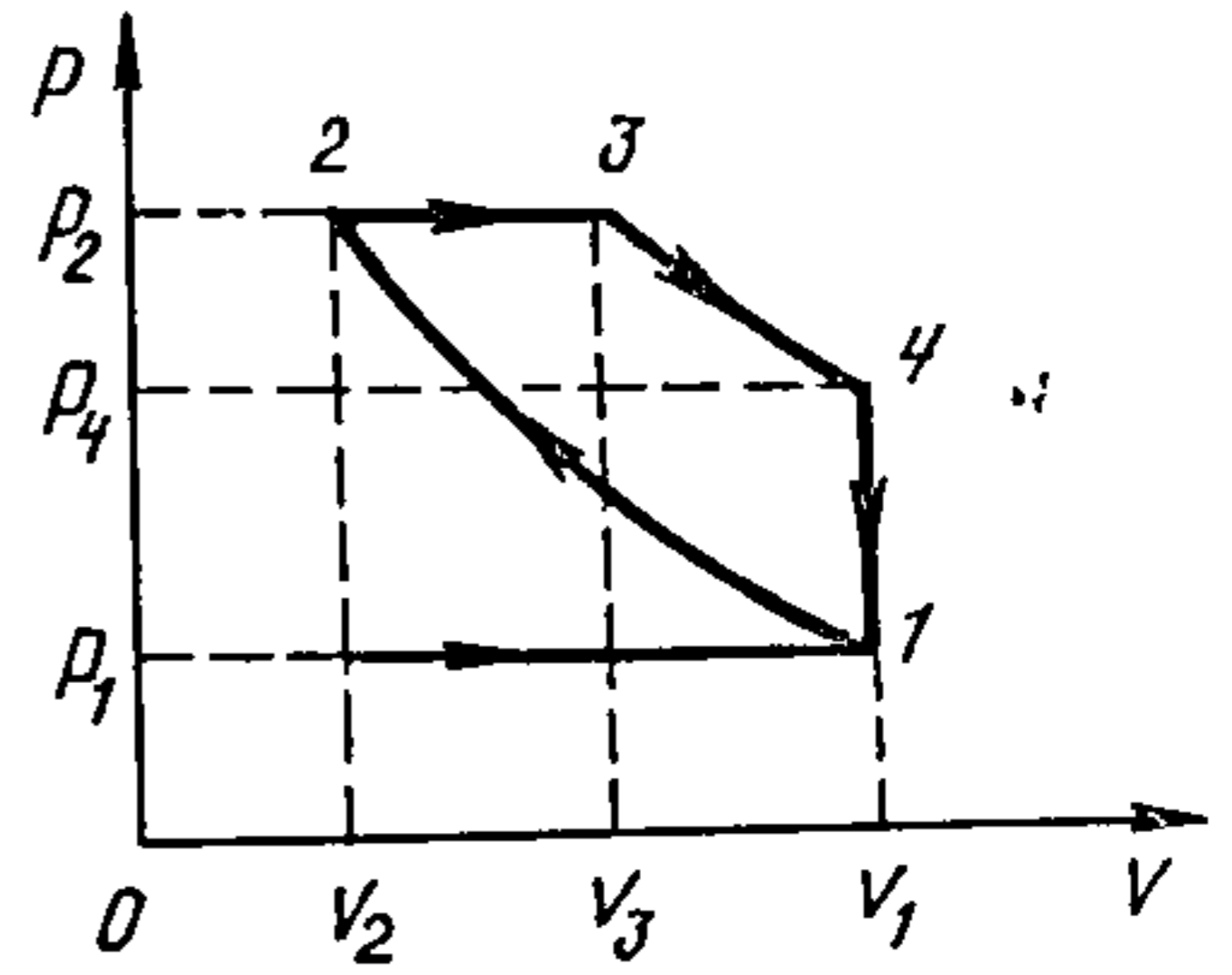


Рис.14.10

циклах робоче ціла (ідеальны газ з паказальнікам адыябаты  $\gamma$ ) атрымлівае ад награвальніка аднолькавую колькасць цеплыні  $Q$ , але мае розныя ступені сціскання  $n$  ( $n = V_1 / V_2$ , дзе  $V_1$  — максімальны аб'ём, а  $V_2$  — мінімальны аб'ём робочага ціла). Як уплывае ступень сціскання на ККДз цеплавога рухавіка?

14.27. На рис. 14.8 прыведзены цыкл карбюратарнага чатырохтактавага рухавіка ўнутранага згарання, які складаецца з дзвюх ізахор  $1-4$  і  $2-3$  і дзвюх адыябат  $1-2$  і  $3-4$ . Ступень сціскання гаручай сумесі, якую можна лічыць ідеальным газам з паказальнікам адыябаты  $\gamma$ ,  $n = V_1 / V_2$ . Вызначыць ККДз цыкла.

14.28. У цыкле рухавіка ўнутранага згарання (гл. задачу 14.27) гаручая сумесь, якую можна лічыць двухатамным газам з жорсткімі малекуламі, сціскаецца да аб'ёму  $2,0 \text{ дм}^3$ . Ход і дыяметр поршня роўныя адпаведна  $40$  і  $15 \text{ см}$ . Вызначыць ККДз цыкла.

14.29. Параўнаць ККДз дзвюх цеплавых машын, цыклы работы якіх паказаны на рис. 14.9. Першы цыкл складаецца з дзвюх адыябат  $1-2$  і  $3-4$ , ізабары  $2-3$  і ізахоры  $4-1$ , другі — з дзвюх адыябат  $1-2$  і  $3-4$  і дзвюх ізабар  $2-3$  і  $4-1$ . Участкі  $2-3$  у абодвух цыклах аднолькавыя.

14.30. На рис. 14.10 прыведзены цыкл чатырохтактавага рухавіка Дызеля, які складаецца з ізабары  $2-3$ , ізахоры  $4-1$  і дзвюх адыябат  $1-2$  і  $3-4$ . Ступень адыябатнага сціскання  $n = V_1 / V_2$ , а ступень ізабарнага

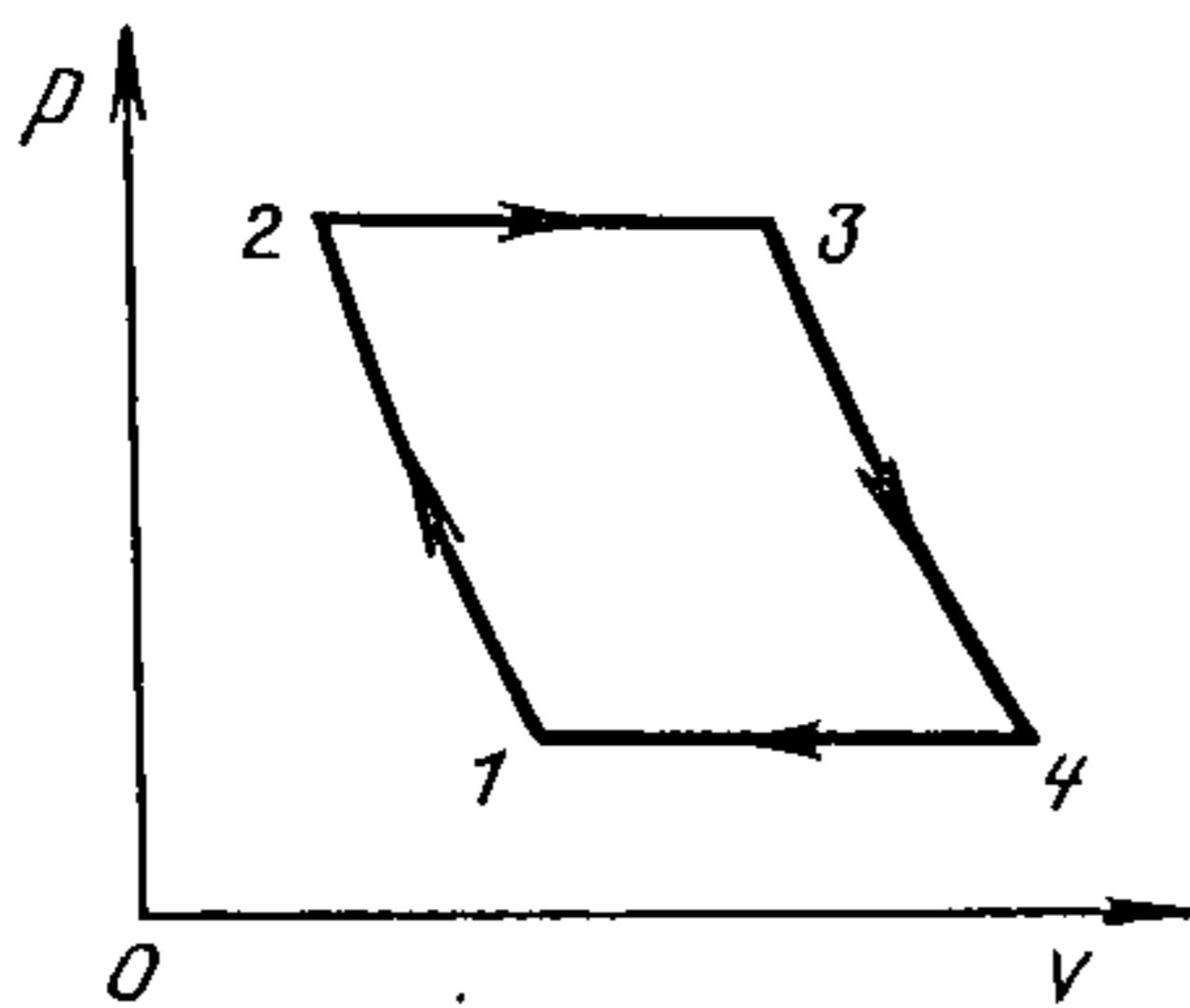


Рис.14.11

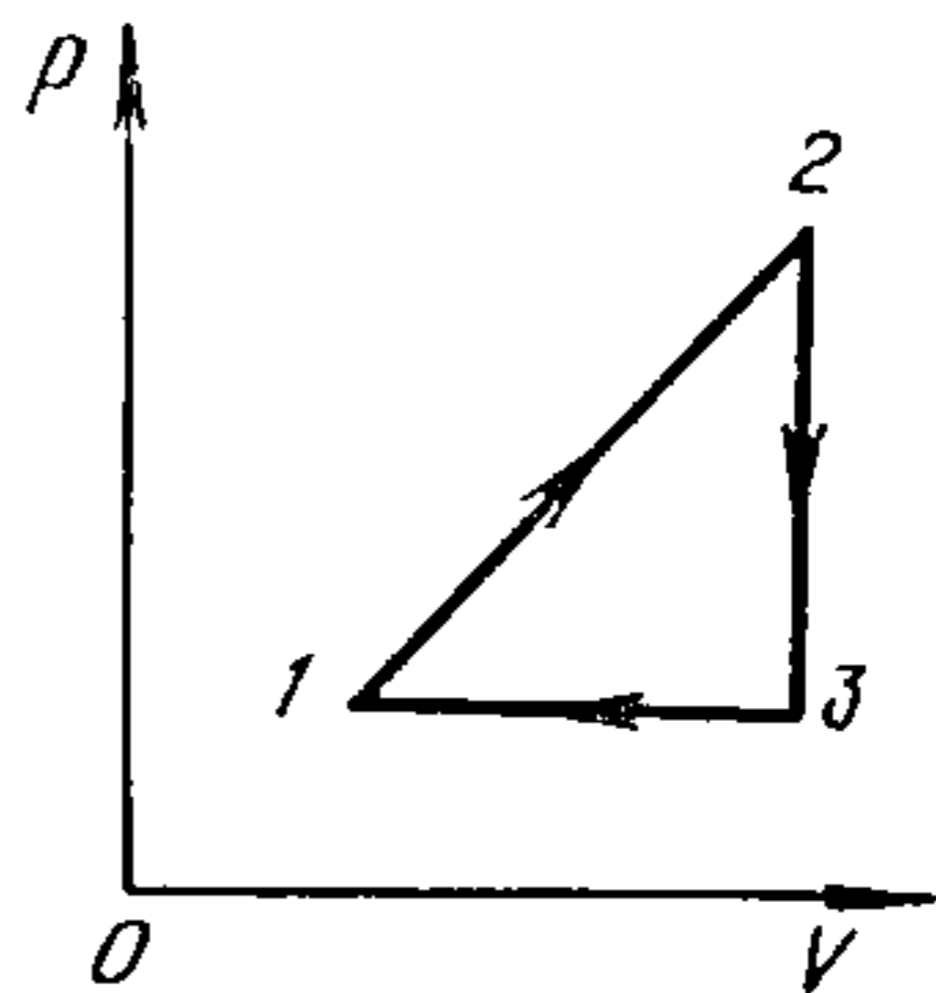


Рис.14.12

расширения  $k = V_3 / V_2$ . Вызначыць ККДз цыкла. Рабочае рэчыва — ідэальны газ з паказальнікам адыябаты  $\gamma$ .

14.31. На рис. 14.11 прыведзены цыкл праматочнага павестранарэактыўнага рухавіка, які складаецца з дзвюх адыябат  $1-2$  і  $3-4$  і дзвюх ізабар  $4-1$  і  $2-3$ . Ступень павышэння ціску пры адыябатным сцісканні  $\delta = p_2 / p_1$ . Вызначыць ККДз цыклу. Рабочае рэчыва — ідэальны газ з паказальнікам адыябаты  $\gamma$ .

14.32. Цеплавая машына працуе па цыкле, які складасца з ізахоры  $2-3$ , ізабары  $3-1$  і палітропы  $1-2$  (рис. 14.12). Для палітропы ціск газу і аб'ём звязаны суадносінай  $p = \alpha V$ , дзе  $\alpha$  — пастаянная велічыня. Знайсці ККДз цеплавой машыны, калі ў якасці рабочага цела ў ёй скарыстоўваецца аднаатомны ідэальны газ. Максімальная тэмпература ў цыкле ў 4 разы большая за мінімальную.

### Энтрапія

14.33. Да якой тэмпературы трэба давесці кісларод масай 4,0 кг, які знаходзіцца пры тэмпературы  $227^\circ \text{C}$ , не змяняючы яго аб'ёму, каб паменшыць энтрапію кіслароду на  $1,31 \text{ кДж/К}$ ?

14.34. Пры награванні аргону масай 8,0 г яго абсалютная тэмпература павялічылася ў 2 разы. Вызначыць прырашчэнне энтрапіі пры: 1) ізахорным; 2) ізабарным награванні.

14.35. Гелій у колькасці 1 моль пры ізабарным расшырэнні павялічыў свой аб'ём у 4 разы. Знайсці адпаведнае прырашчэнне энтрапіі.

14.36. Два аб'ёмы газу, які знаходзіўся першапачаткова пры адной і той жа тэмпературы і ціску, сціскаюць ад значэння  $V$  да  $V/2$ : адзін ізатэрмічна, а другі адыябатна. У якім выпадку канечная тэмпература будзе большай? Ці будзе мець месца змяненне энтрапіі пры абодвух працэсах?

14.37. Як будзе выглядаць цыкл Карно на дыяграме  $S, T$ , калі выразіць стан сістэмы праз энтрапію  $S$  і абсалютную тэмпературу  $T$  замест ціску і аб'ёму?

14.38. У выніку ізатэрмічнага сціскання паветра аб'ёмам  $887 \text{ дм}^3$ , якое

знаходзіцца пры тэмпературы  $30^\circ\text{C}$  і пачатковым ціску  $0,10\text{ МПа}$ , энтрапія яго паменшылася на  $673\text{ Дж/К}$ . Вызначыць аб'ём паветра ў канцы працэсу.

14.39. Кісларод і вадарод, якія маюць роўныя масы, аднолькава ізатэрмічна сціскаюцца. Для якога газу прырашчэнне энтрапіі будзе большым і ў колькі разоў?

14.40. Вызначыць прырашчэнне энтрапіі вуглякіслага газу масай  $1,0\text{ кг}$  у працэсе сціскання ад ціску  $0,20\text{ МПа}$  пры тэмпературы  $40^\circ\text{C}$  да ціску  $4,5\text{ МПа}$  пры тэмпературы  $253^\circ\text{C}$ .

14.41. Вылічыць прырашчэнне энтрапіі ідэальнага газу ў колькасці  $1$  моль пры расшырэнні яго па палітропе  $pV^n = \text{const}$  ад аб'ёму  $V_1$  да аб'ёму  $V_2$ .

14.42. Ідэальны газ удзельнічае ў двух абарачальных працэсах  $1-2-3$  і  $1-4-3$  (рыс. 14.13). Паказаць, што цеплыня, перададзеная газу ў кожным з працэсаў, розная, а змяненне энтрапіі адно і тое ж.

14.43. Кісларод масай  $1,0\text{ кг}$  пры ціску  $0,50\text{ МПа}$  і тэмпературы  $127^\circ\text{C}$  ізабарна расшырыўся, павялічыўшы свой аб'ём у  $2$  разы, а затым быў сціснуты ізатэрмічна да ціску  $4,0\text{ МПа}$ . Вызначыць сумарнае прырашчэнне энтрапіі.

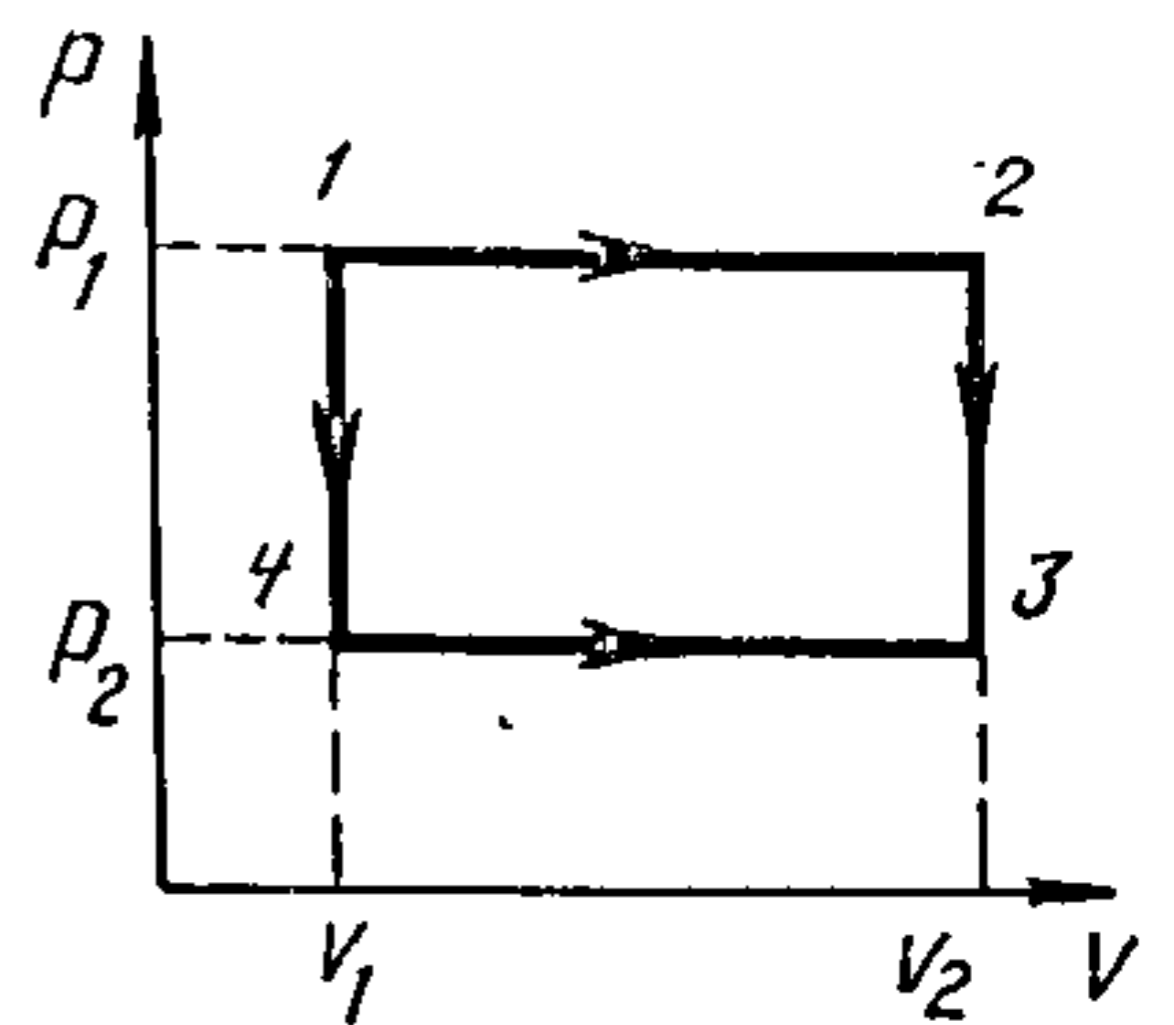
14.44. Паветра масай  $1,0\text{ кг}$  сціснулі адыябатна так, што аб'ём яго паменшыўся ў  $6$  разоў, а затым пры пастаянным аб'ёме ціск узрос у  $1,5$  раза. Вызначыць прырашчэнне энтрапіі ў гэтым працэсе.

14.45. Вызначыць прырашчэнне энтрапіі пры змешванні азоту масай  $3,0\text{ кг}$  і вуглякіслага газу масай  $2,0\text{ кг}$ . Тэмпература і ціск газаў да змешвання аднолькавыя.

14.46. Два балоны з кіслародам ёмістасцю  $2,0$  і  $4,0\text{ дм}^3$  злучаны трубкай з кранам. Пачатковая тэмпература ў абодвух балонах аднолькавая і роўная  $27^\circ\text{C}$ . Ціск у першым балоне  $0,10\text{ МПа}$ , у другім  $0,60\text{ МПа}$ . Знайсці прырашчэнне энтрапіі сістэмы пасля таго, як адкрываюць кран, калі сістэма змешчана ў цеплаізаляваную абалонку.

14.47. Два балоны з паветрам ёмістасцю  $0,50$  і  $1,0\text{ м}^3$  злучаны трубкай з кранам. У першым балоне знаходзіцца паветра масай  $3,0\text{ кг}$  пры тэмпературы  $27^\circ\text{C}$ , у другім —  $5,0\text{ кг}$  пры тэмпературы  $57^\circ\text{C}$ . Знайсці прырашчэнне энтрапіі сістэмы пасля адкрыцця крана і дасягнення раўнаважнага стану. Сценкі балонаў і трубка забяспечваюць поўную цеплаізаляцыю паветра ад навакольнага асяроддзя.

14.48. Ідэальны газ у колькасці  $1$  моль ізатэрмічна расшыраецца так, што пры гэтым адбываецца прырашчэнне энтрапіі на  $5,75\text{ Дж/К}$ . Вызначыць натуральны лагарыфм адносіны тэрмадынамічных імавернасцей пачатковага і канечнага станаў газу, а таксама адносіну пачатковага і канечнага яго ціскаў.



Рыс.14.13



14.49. Энтрапія тэрмадынамічнай сістэмы ў некаторым стане роўная 3,18 мДж/К. Чаму роўная статыстычная вага гэтага стану сістэмы?

## § 15. РЕАЛЬНЫЯ ГАЗЫ І ВАДКАСЦІ

Ураўненне Ван-дэр-Ваальса для адвольнай масы  $m$  газу

$$\left( p + \frac{m^2}{M^2} \frac{a}{V^2} \right) \left( V - \frac{m}{M} b \right) = \frac{m}{M} RT,$$

дзе  $a$  і  $b$  — пастаянныя Ван-дэр-Ваальса.

Сувязь крытычных параметраў—малярнага аб'ёму, ціску і тэмпературы газу з пастаяннымі  $a$  і  $b$  Ван-дэр-Ваальса

$$V_{\text{МК}} = 3b; \quad p_{\text{К}} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{\text{К}} = \frac{8a}{27bR}.$$

Ураўненне Ван-дэр-Ваальса ў прыведзеных велічынях для 1 моль

$$\left( \pi + \frac{3}{\omega^2} \right) (3\omega - 1) = 8\tau,$$

дзе  $\pi = p/p_{\text{К}}$ ;  $\omega = V_{\text{М}}/V_{\text{МК}}$ ;  $\tau = T/T_{\text{К}}$ .

Адносная вільготнасць паветра  $\varphi$

$$\varphi = p/p_0,$$

дзе  $p$  — парцыяльны ціск вадзяной пары, якая змяшчаецца ў паветры пры дадзенай тэмпературы (абсалютная вільготнасць),  $p_0$  — ціск насычанай пары пры той жа тэмпературы.

Ураўненне Клапейрона—Клаўзіуса

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(v_2 - v_1)},$$

дзе  $T$ ,  $\lambda$  — тэмпература і ўдзельная цеплыня пераходу рэчыва з 1 → 2;  $v_1$  і  $v_2$  — удзельныя аб'ёмы рэчыва ў двух станах.

Паверхневае нацяжэнне

$$\sigma = \Delta E / \Delta S,$$

дзе  $\Delta E$  — змяненне свабоднай энергіі паверхневага слою вадкасці;  $\Delta S$  — змяненне плошчы гэтага слою.

Дадатковы ціск, абумоўлены крывізной паверхні вадкасці (формула Лапласа),

$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

дзе  $R_1$ ,  $R_2$  — радыусы крывізны двух узаемна перпендыкулярных сячэнняў паверхні вадкасці.

Вышыня падняцця вадкасці ў капілярных трубках

$$h = 2\sigma \cos \theta / (\rho g r),$$

дзе  $\theta$  — краявы вугал;  $\rho$  — шчыльнасць вадкасці;  $r$  — радыус канала трубка.

Адноснае змяненне аб'ёму вадкасці пры награванні

$$\Delta V/V = \beta \Delta T,$$

дзе  $\beta$  — тэмпературны каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння.

Адноснае змяненне аб'ёму вадкасці пры змяненні ціску

$$\Delta V / V = -k \Delta p,$$

дзе  $k$  — каэфіцыент сціскання.

Шчыльнасць вадкасці пры тэмпературы  $t$

$$\rho_t = \rho_0 / (1 + \beta t),$$

дзе  $\rho_0$  — шчыльнасць пры  $0^\circ \text{C}$ .

Асматычны ціск раствору (формула Вант-Гофа)

$$p = CRT,$$

дзе  $C = m/(MV)$  — лік моляў растваранага рэчыва ў адзінцы аб'ёму раствору.

## Рэальныя газы

15.1. Аргон масай 4,0 г займае аб'ём 0,10 дм<sup>3</sup> пад ціскам 2,5 МПа. Знайсці тэмпературу газу, калі лічыць яго ідэальным, рэальным.

15.2. Які ціск вуглякіслага газу пры тэмпературы  $3^\circ \text{C}$ , калі яго шчыльнасць пры гэтай тэмпературы 550 кг/м<sup>3</sup>?

15.3. Вылічыць унутраны ціск вады, калі вядома пастаянная  $a$  ва ўраўненні Ван-дэр-Ваальса.

15.4. Знайсці дыяметр малекулы аргону па вядомай пастаяннай  $b$  ва ўраўненні Ван-дэр-Ваальса.

15.5. У балоне ёмістасцю 22 дм<sup>3</sup> знаходзіцца азот масай 0,70 кг пры тэмпературы  $0^\circ \text{C}$ . Вызначыць ціск газу на сценкі балона, унутраны ціск і ўласны аб'ём малекул.

15.6. Аб'ём кіслароду масай 4,0 г павялічваецца ад 1,0 да 5,0 дм<sup>3</sup>. Разглядаючы газ як рэальны, знайсці работу ўнутраных сіл пры гэтым расшырэнні.

15.7. Знайсці пастаянныя  $a$  і  $b$  для бензолу ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) ва ўраўненні Ван-дэр-Ваальса па вядомых для яго значэннях крытычных тэмпературы  $T_k$  і ціску  $p_k$ .

15.8. Вызначыць шчыльнасць вады ў крытычным стане па вядомай пастаяннай  $b$  ва ўраўненні Ван-дэр-Ваальса.

15.9. Знайсці шчыльнасць вадароду ў крытычным стане па вядомых для яго значэннях крытычных тэмпературы  $T_k$  і ціску  $p_k$ .

15.10. Які ўнутраны ціск вуглякіслага газу ў момант звадкавання, калі пры гэтым яго шчыльнасць 550 кг/м<sup>3</sup>, а таксама вядомы крытычныя тэмпература  $T_k$  і ціск  $p_k$ ?

15.11. Якая павінна быць маса вады, налітай ў запаяную пасудзіну ёмістасцю 30 см<sup>3</sup>, каб яе можна было прывесці ў крытычны стан шляхам награвання?

15.12. Знайсці крытычны аб'ём кіслароду ў колькасці 1 моль па вядомых для яго значэннях крытычных тэмпературы  $T_k$  і ціску  $p_k$ .

15.13. Вызначыць дыяметр малекулы кіслароду па вядомых для яго значэннях крытычных тэмпературы  $T_k$  і ціску  $p_k$ .

15.14. Якая сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу малекул азоту пры нармальных умовах, калі вядома пастаянная  $b$  Ван-дэр-Ваальса?

15.15. Вызначыць сярэднюю даўжыню свабоднага прабегу малекул аргону пры нармальных умовах, калі для яго вядомы крытычныя тэмпература  $T_k$  і ціск  $p_k$ .

15.16. Вадарод знаходзіцца пры тэмпературы  $27^\circ\text{C}$  і ціску  $0,20\text{ МПа}$ . Лічачы вядомымі для яго крытычныя тэмпературу  $T_k$  і ціск  $p_k$ , знайсці каэфіцыент дыфузіі вадароду.

15.17. Ціск газу ў 12 разоў большы за яго крытычны ціск, аб'ём роўны палове крытычнага аб'ёму. Выкарыстоўваючы ўраўненне Ван-дэр-Ваальса ў прыведзеных велічынях, вызначыць, у колькі разоў тэмпература газу большая за яго крытычную тэмпературу.

15.18. Колькі малекул вадзяной пары змяшчаецца ў пакоі ёмістасцю  $150\text{ м}^3$  пры тэмпературы  $20^\circ\text{C}$  і адноснай вільготнасці  $30\%$ ?

15.19. Паветра аб'ёмам  $1\text{ м}^3$  знаходзіцца пры тэмпературы  $17^\circ\text{C}$  і адноснай вільготнасці  $50\%$ . Якой будзе маса выпаўшай расы, калі, не мяняючы тэмпературу паветра, паменшыць яго аб'ём у 3 разы?

15.20. Знайсці масу вільготнага паветра аб'ёмам  $1,0\text{ м}^3$  пры тэмпературы  $29^\circ\text{C}$ , адноснай вільготнасці  $60\%$  і нармальным атмасферным ціску.

15.21. Адносна вільготнасць паветра, якое знаходзіцца ў пасудзіне пры тэмпературы  $20^\circ\text{C}$ , роўная  $70\%$ . На колькі зменіцца адносна вільготнасць паветра, калі яго нагрэць да  $100^\circ\text{C}$ , а аб'ём пры гэтым паменшыць у 2 разы?

15.22. Дзве вадкасці — тэтрахларыд вугляроду  $\text{CCl}_4$  і вада, якія не змешваюцца, налітыя ў шклянку. Ва ўмовах нармальнага атмасфернага ціску  $\text{CCl}_4$  кіпіць пры  $76,7^\circ\text{C}$ , а вада пры  $100^\circ\text{C}$ . Калі шклянку раўнамерна нагрэць у вадзяной лазні, кіпенне на граніцы раздзелу вадкасцей пачынаецца пры тэмпературы  $65,5^\circ\text{C}$ . Вызначыць, якая з вадкасцей хутчэй выкіпае пры такім пагранічным кіпенні і ў колькі разоў. Ціск насычанай пары вады пры  $65,5^\circ\text{C}$  складае  $26,0\text{ кПа}$ .

15.23. Які атмасферны ціск, калі вада кіпіць пры тэмпературы  $95^\circ\text{C}$ ? Удзельныя аб'ёмы вады і пары роўныя адпаведна  $1,04\text{ дм}^3/\text{кг}$  і  $1,67\text{ м}^3/\text{кг}$ .

15.24. У закрытай пасудзіне ёмістасцю  $4,0\text{ дм}^3$  знаходзіцца вада масай  $2,0\text{ кг}$  пры тэмпературы  $373\text{ К}$ . На колькі трэба павысіць тэмпературу сістэмы, каб маса насычанай пары, якая знаходзіцца над вадой, павялічылася на  $1,6\text{ г}$ ?

15.25. Да якой тэмпературы была нагрэта насычаная вадзяная пара, якая знаходзіцца пры тэмпературы  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ , калі ціск яе павялічыўся ў 8 разоў?



## Вадкасці

15.26. Колькі малекул змяшчаецца ў вадзе аб'ёмам  $1 \text{ м}^3$ ? Якая маса малекулы вады?

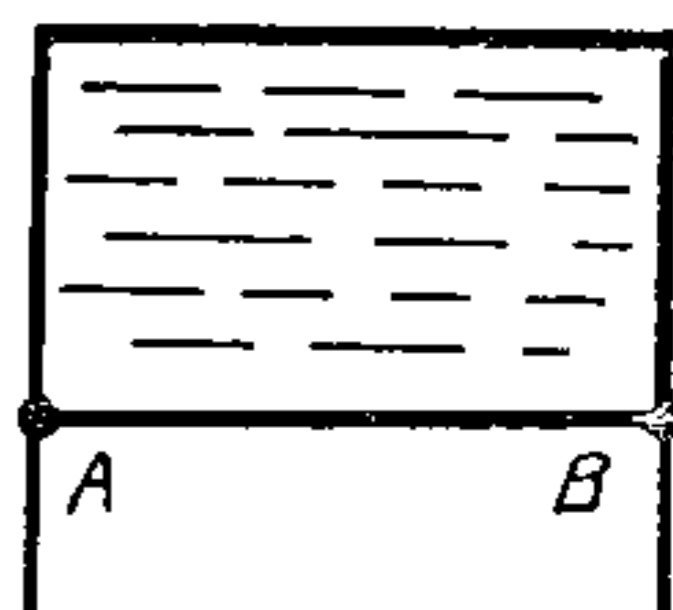
15.27. Вылічыць аб'ём, які займае малекула вады, і рабро кубіка, які прыходзіцца на адну малекулу.

15.28. З якой сілай уцягваецца ў сярэдзіну вады яе малекула, якая знаходзіцца на паверхні, калі малекулярны (паверхневы) ціск вады  $1,0 \text{ ГПа}$ ?

15.29. Ніжні край тонкай прамавугольнай пласцінкі датыкаецца да паверхні вадкасці. Каб адарваць пласцінку ад вадкасці, трэба падзейнічаць сілай  $8,8 \text{ мН}$ . Даўжыня ніжняга краю пласцінкі  $6,0 \text{ см}$ . Чаму роўнае паверхневае нацяжэнне вадкасці?

15.30. Рамка з рухомай ніжняй перакладзінай даўжынёй  $15 \text{ см}$  зацягнута мыльнай плёнкай. Якую трэба выканаць работу супраць сіл паверхневага нацяжэння, каб расцягнуць плёнку на  $4,0 \text{ см}$ , калі  $\sigma = 45 \text{ мН/м}$ ?

15.31. Контур з дроту дыяметрам  $1,22 \text{ мм}$  мае рухомы бок  $AB$  (рыс. 15.1). Вызначыць, з якога матэрыялу зроблены контур, калі пасля зацягвання яго мыльнай плёнкай бок  $AB$  застаўся ў раўнавазе. Паверхневае нацяжэнне мыльнага раствору  $45 \text{ мН/м}$ .



Рыс. 15.1

15.32. На якую вышыню падымасца пад дзеяннем капілярных сіл вада ва ўтвораных у глебе капілярах дыяметрам  $0,3 \text{ мм}$  і ў сцяблах жыта, што маюць сярэдні дыяметр пор  $20 \text{ мкм}$ ? Змочванне лічыць поўным.

15.33. Вызначыць работу, неабходную для ператварэння вады масай  $1,0 \text{ г}$  у туман, г. зн. для распылення ў кропелькі дыяметрам  $0,20 \text{ мкм}$ .

15.34. Якую колькасць цеплыні атрымлівае кропля ртуці, утвораная пры зліцці  $64$  кропель радыусам  $2,0 \text{ мм}$  кожная?

15.35. Кнот падымае вадзі на вышыню  $8,0 \text{ см}$ . На якую вышыню па гэтым кноце падымаецца газа?

15.36. Вызначыць рознасць узроўняў вады ў капілярах дыяметрамі  $0,5$  і  $1,0 \text{ мм}$ , якія апушчаны ў пасудзіну з вадой. Якая была б рознасць узроўняў, калі б капіляры апусцілі ў пасудзіну з ртуцю?

15.37. У пасудзіну з вадой пры тэмпературы  $20^\circ \text{ С}$  апушчаны капіляр, дыяметр унутранага канала якога  $0,10 \text{ мм}$ . Пры награванні вады да  $70^\circ \text{ С}$  узровень вады ў капіляры знізіўся на  $3,2 \text{ см}$ . Вызначыць паверхневае нацяжэнне вады пры тэмпературы  $70^\circ \text{ С}$ . Расшырэнне шкла пры награванні не ўлічваць.

15.38. Для дэманстрацыі паверхневага нацяжэння ў драцяное сіта, усе дроцікі якога пакрыты тонкім сласм парафіну, наліваюць вадзі. Да якой найбольшай вышыні можна наліць вадзі ў такое сіта, каб яна не працякала скрозь адтуліны ў ім? Лічыць, што адтуліны маюць круглую форму дыяметрам  $0,20 \text{ мм}$ .

15.39. У дне шкляной пасудзіны з ртуццю трэшчына. Вышыня слупа ртуці ў пасудзіне 20,0 см. Вызначыць найбольшую шырыню трэшчыны, пры якой ртуць яшчэ не будзе вылівацца з пасудзіны.

15.40. З якім паскарэннем трэба падымаць капілярную трубку з навіслай унізе кропелькай вады, каб вышыня слупа вады ў трубцы зменшылася ўдвая (частка вадкасці вылілася)?

15.41. У шкляны капіляр, апушчаны ў пасудзіну з вадой, кааксіяльна ўстаўлены другі капіляр, унутраны дыяметр якога роўны шырыні зазору паміж капілярамі. У якім з капіляраў узровень вады будзе вышэйшы і ў колькі разоў? Таўшчыню сценак унутранага капіляра не ўлічваць.

15.42. Вызначыць дыяметр кроплі золата ў момант яе адрыву пры плаўленні залатога дроту дыяметрам  $d = 0,20$  мм.

15.43. Пры плаўленні сярэбранага дроту дыяметрам  $d = 2,0$  мм утварылася 12 кропель серабра, пры гэтым дрот укараціўся на  $h = 205$  мм. Вызначыць паверхневае нацяжэнне вадкага серабра.

15.44. У вадкасць на нязначную глыбіню апушчана капілярная трубка з дыяметрам канала  $d = 2,0$  мм. Якая маса вадкасці ўвойдзе ў трубку, калі паверхневае нацяжэнне яе  $\sigma = 43$  мН/м? Змочванне лічыць поўным.

15.45. У адкрытым капіляры знаходзіцца вада. Якая павінна быць маса вады, каб пры вертыкальным становішчы капіляра ў створаным слупку ніжні меніск быў увагнуты, плоскі, выпуклы? Унутраны дыяметр капіляра 1,0 мм. Змочванне лічыць поўным.

15.46. У адкрытым капіляры, унутраны дыяметр якога 1 мм, знаходзіцца кропля вады масай: 1)  $m = 18$  мг; 2)  $m = 23,3$  мг; 3)  $m = 34$  мг. Вызначыць радыусы крывізны верхняга  $R_1$  і ніжняга  $R_2$  меніскаў у кожным з гэтых выпадкаў пры вертыкальным становішчы капіляра.

15.47. У гарызантальным капіляры, унутраны дыяметр якога 1,0 мм, знаходзіцца слупок гліцэрына. Якой павінна быць даўжыня слупка, каб пры вертыкальным становішчы капіляра гліцэрын з яго не выліваўся? Змочванне лічыць поўным.

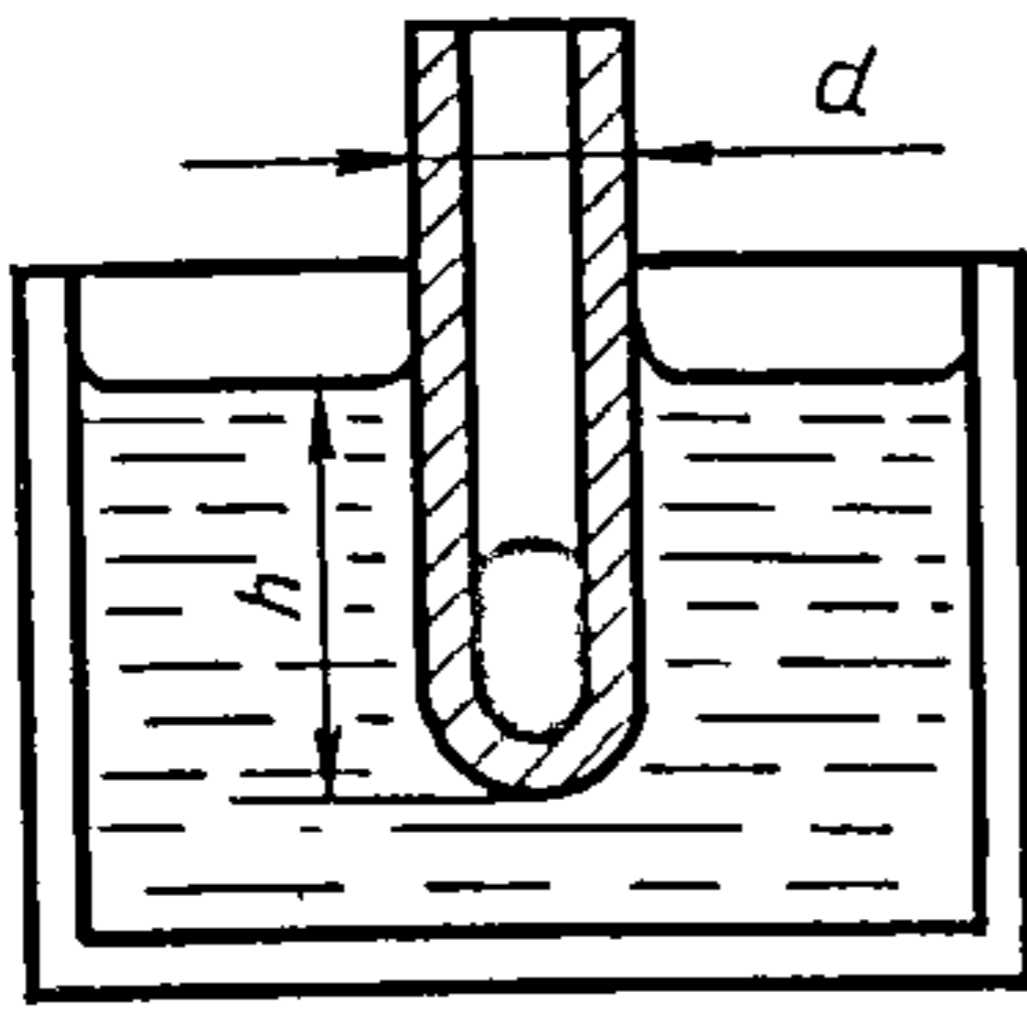
15.48. У лейку наліты спірт. Дыяметр адростка лейкі 0,40 мм. Да якой вышыні трэба наліць спірт, каб ён пачаў па кроплях вылівацца з адростка?

15.49. Гарызантальны капіляр, унутраны дыяметр якога  $d = 2,0$  мм, напоўнены касторавым маслам. Даўжыня слупка масла ў капіляры  $l = 4,0$  см. Пасля таго як капіляр быў пастаўлены вертыкальна, з яго выцекла масла масай  $m = 77$  мг. Вызначыць паверхневае нацяжэнне масла. Змочванне лічыць поўным.

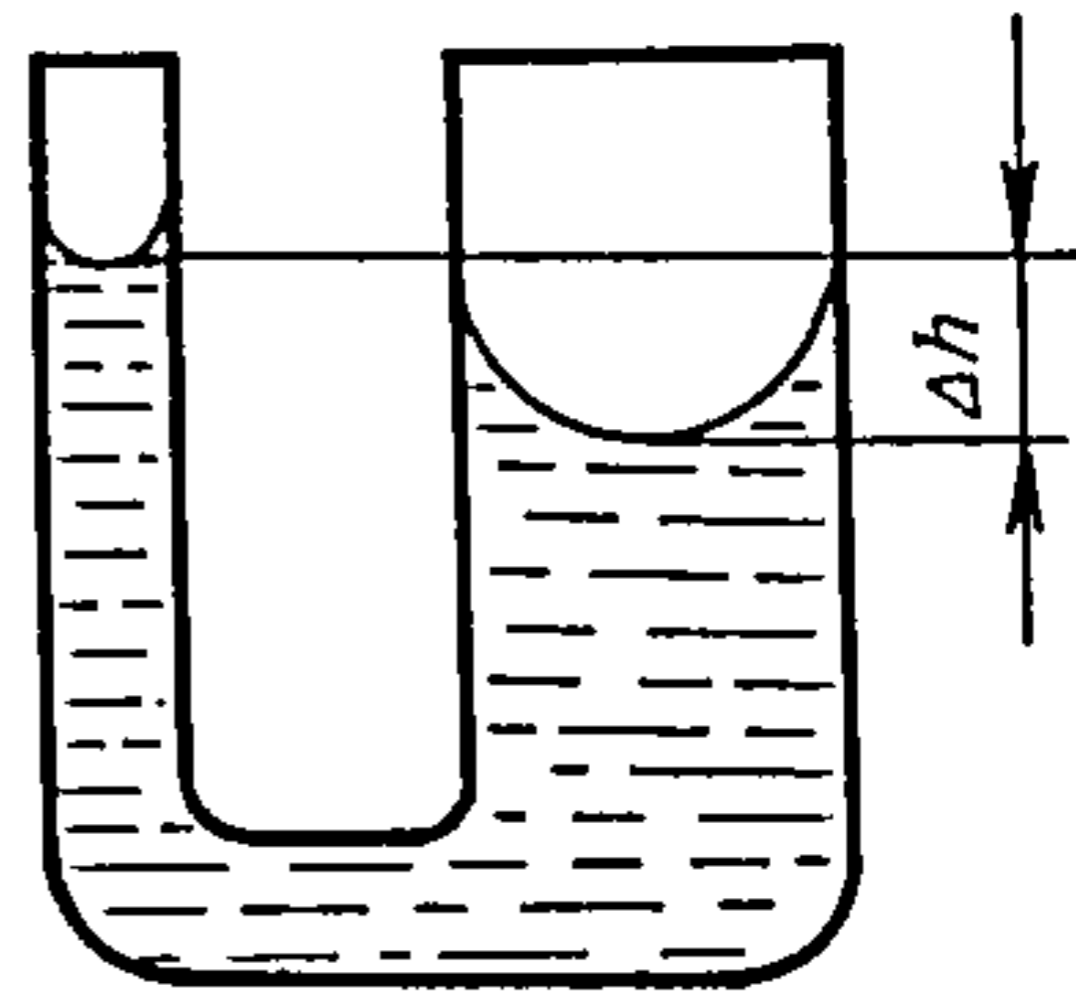
15.50. Капіляр, знешні дыяметр якога 3,0 мм, запаяны з аднаго канца. У запаяным канцы знаходзіцца невялікі слупок ртуці (рыс. 15.2). Агульная маса капіляра з ртуццю 0,20 г. Капіляр запаяным канцом апушчаны ў пасудзіну з вадой. Вызначыць глыбіню апускання капіляра ў ваду. Змочванне лічыць поўным.

15.51. Вызначыць масу спірту, паднятага паміж дзвюма плоскапара-





Рыс. 15.2



Рыс. 15.3

лельнымі шклянымі пласцінкамі шырынёй 10 см, якія апушчаны ў пасудзіну з спіртам.

15.52. Дзве вертыкальныя плоскапаралельныя шкляныя пласцінкі, якія знаходзяцца на адлегласці  $d = 0,20$  мм адна ад другой, апушчаны ў вадкасць. Вызначыць шчыльнасць вадкасці, калі вядома, што яна паднялася паміж пласцінкамі на вышыню  $h = 3,24$  см. Паверхневае нацяжэнне вадкасці  $\sigma = 27$  мН/м. Змочванне лічыць поўным.

15.53. Кропля ртуці масай  $m = 1,36$  г уведзена паміж паралельнымі шклянымі пласцінкамі. Якую сілу трэба прыкладзі, каб расплюшчыць кроплю да таўшчыні  $d = 0,10$  мм? Нязмочванне лічыць поўным.

15.54. Якая будзе вышыня слупа ртуці ў бараметрычнай трубцы дыяметрам 2,0 мм, калі атмасферны ціск 0,10 МПа? Які павінен быць мінімальны дыяметр бараметрычнай трубкі, каб папраўка на паверхневае нацяжэнне не перавышала 13,3 Па?

15.55. Бараметрычная трубка, дыяметр унутранага сячэння якой  $d = 4,0$  мм, запоўнена ртутцю і апушчана адкрытым канцом у шырокую пасудзіну. Рознасць узроўняў ртуці ў трубцы і пасудзіне  $\Delta h = 75,6$  см. Чаму роўны атмасферны ціск?

15.56. Рознасць узроўняў вады ў U-падобным капіляры (дыяметры каналаў  $d_1 = 1,0$  мм і  $d_2 = 3,0$  мм)  $\Delta h = 2,0$  см (рыс. 15.3). Вызначыць паверхневае нацяжэнне вады. Змочванне лічыць поўным.

15.57. Рознасць узроўняў ртуці ў U-падобным капіляры 1 см (гл. задачу 15.56). Вызначыць паверхневае нацяжэнне ртуці. Нязмочванне лічыць поўным.

15.58. Вакуумная помпа злучана з адкрытым U-падобным ртутным манометрам. Дыяметры трубак манометра 0,25 і 4 см. Якая рознасць ціскаў паветра, калі ўзроўні ртуці ў трубках аднолькавыя? Да якой з трубак павінна быць далучана помпа?

15.59. Шчыльнасць паветра ў бурбалцы, якая знаходзіцца на дне вадаёма глыбінёй 6 м, у 5 разоў большая за шчыльнасць паветра пры атмасферным ціску (пры той жа тэмпературы). Вызначыць радыус бурбалкі.

15.60. Вызначыць дабавачны ціск і шчыльнасць паветра ў сярэдзіне мыльнай бурбалкі дыяметрам 1,0 см пры тэмпературы  $20^\circ\text{C}$  і атмасфер-



ным ціску 0,10 МПа. Павярхневае нацяжэнне мыльнай вады 45 мН/м.

15.61. Якую работу супраць сіл павярхневага нацяжэння трэба выканаць, каб, выдзімаючы мыльную бурбалку, павялічыць яе дыяметр ад 1,0 да 9,0 см?

15.62. Мыльная бурбалка сфэрычнай формы выдзімаецца так, што яе радыус кожную секунду павялічваецца на 1 см. Вылічыць магутнасць, неабходную для выдзімання бурбалкі радыусам 5 см.

15.63. Дзве мыльныя бурбалкі радыусамі 8 і 4 см выдзьмуты на розных канцах адной і той жа трубкі. Вызначыць: 1) якая бурбалка будзе павялічвацца і якая памяншацца, калі іх пакінуць сам-насам; 2) на колькі зменіцца радыус малой бурбалкі, калі радыус вялікай змяніўся на 0,2 см.

15.64. Якую работу трэба выканаць, каб выдзьмуць мыльную бурбалку дыяметрам 10 см? Працэс выдзімання лічыць ізатэрмічным.

15.65. Чаму роўны каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння газы, калі ўзровень яе ў адным калене сазлучаных сасудаў, у якія яна наліта, 28 см, у другім — 30 см. Тэмпература ў адным калене  $10^\circ\text{C}$ , у другім  $-80^\circ\text{C}$ .

15.66. Знайсці шчыльнасць  $\rho_2$  масла ў гідраўлічнай сістэме прэса пры ціску  $p_2$ , калі шчыльнасць яго пры ціску  $p_1$  была  $\rho_1$ . Каэфіцыент сціскання роўны  $k$ .

15.67. Каэфіцыент аб'ёмнага расшырэння ртуці  $\beta = 0,18\text{ мК}^{-1}$ , а каэфіцыент сціскання  $k = 39,5\text{ пПа}^{-1}$ . Вызначыць прырашчэнне знешняга ціску, пры якім захаваецца пастаянны аб'ём ртуці, калі нагрэць яе на 10 К.

15.68. Знайсці скорасць падзення кропелькі вады ў паветры, калі яе радыус 5 мкм.

15.69. На дне цыліндрычнай пасудзіны, напоўненай касторавым маслам да вышыні 25 см, утрымліваецца драўляны шарык дыяметрам 9,0 мм. Які каэфіцыент вязкасці касторавага масла, калі пасля таго, як шарык адпусцілі, ён усплыў на павярхню праз 10 с? Шчыльнасць дрэва прыняць роўнай  $400\text{ кг/м}^3$ .

15.70. Асматычны ціск раствору пры тэмпературы  $27^\circ\text{C}$  роўны 0,2 МПа. Колькі часцінак растваранага рэчыва знаходзіцца ў раствору аб'ёмам  $1\text{ дм}^3$ ?

15.71. Для павелічэння асматычнага ціску раствору трэба павялічыць канцэнтрацыю яго ў 1,3 разы. На колькі градусаў неабходна нагрэць раствор, каб, не змяняючы яго канцэнтрацыі, атрымаць такое ж павелічэнне асматычнага ціску? Пачатковая тэмпература раствору  $0^\circ\text{C}$ .

15.72. Які асматычны ціск раствору, калі ў ім на адну малекулу растваранага рэчыва прыпадае 800 малекул вады? Тэмпература раствору  $47^\circ\text{C}$ . Дысацыяцыя адсутнічае.

15.73. Кухонная соль масай 3,0 г растварана ў вадзе аб'ёмам  $1,0\text{ дм}^3$  пры тэмпературы  $30^\circ\text{C}$ . Асматычны ціск пры гэтых умовах аказаўся 0,17 МПа. Якая ступень дысацыяцыі малекул солі?

15.74. Пасудзіна ёмістасцю  $1,0\text{ дм}^3$ , зробленая з паўпранікальнага рэчы-

ва, напоўнена вадой, якая змяшчае кухонную соль масай 0,20 г, і апушчана ў ваду. На колькі з прычыны асматычнага ціску падымаецца ўзровень у вузкай трубцы, якая ўстаўлена ў паўпранікальную пасудзіну, калі пры тэмпературы 27 ° С усе малекулы солі дысацыраваны?

## § 16. ЦЕПЛАВЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ ЦВЁРДЫХ ЦЕЛ. ФАЗАВЫЯ ПЕРАХОДЫ

Адноснае змяненне даўжыні пры змяненні тэмпературы на  $\Delta T$

$$\Delta l / l = \alpha \Delta T,$$

дзе  $l$  — пачатковая даўжыня;  $\alpha$  — каэфіцыент лінейнага расшырэння.

Малярная цеплаёмістасць хімічна простых цвёрдых цел у класічнай тэорыі цеплаёмістасці (закон Дзюлонга—Пці)

$$C = 3R.$$

Цеплаперадача з аднаго асяроддзя ў другое праз пляцоўку  $dS$  за час  $d\tau$

$$dQ = -\alpha dT dS d\tau,$$

дзе  $\alpha$  — каэфіцыент цеплааддачы.

### Цеплавые ўласцівасці цвёрдых цел

16.1. Як суадносяцца даўжыні жалезнага і меднага стрыжняў пры тэмпературы 0 ° С, калі рознасць іх даўжынь пры любой тэмпературы адна і тая ж?

16.2. Гадзіннік з металічным маятнікам спяшаецца на 8,0 с у суткі пры тэмпературы 3 ° С і адстае на 7,0 с у суткі пры тэмпературы 23 ° С. Знайсці каэфіцыент лінейнага расшырэння матэрыялу маятніка і тэмпературу, пры якой гадзіннік будзе ісці правільна.

16.3. Знайсці залежнасць перыяду свабодных ваганняў аднароднага цвёрдага цела вакол гарызантальнай восі, якая не праходзіць праз яго цэнтр цяжару, ад тэмпературы.

16.4. Канцы стальнага стрыжня сячэннем 5,0 см<sup>2</sup> наглуха замацаваны ў дзвюх сценах. Якая сіла дзейнічае на сцены пры тэмпературы 20 ° С, калі пры 10 ° С стрыжань знаходзіцца ў ненапружаным стане?

16.5. Алюмініевы чайнік ёмістасцю 3,0 дм<sup>3</sup> напоўнены вадой пры тэмпературы 5 ° С. Колькі вады вычэча з чайніка пры награванні яго да 70 ° С? Задачу рашыць без уліку і з улікам расшырэння матэрыялу чайніка.

16.6. Латунная шкала ртутнага барометра градуіравана пры тэмпературы 0 ° С. Чаму роўны атмасферны ціск пры тэмпературы 30 ° С, калі барометр паказвае ціск 101,1 кПа? Расшырэнне шкла не ўлічваць.

16.7. Вылічыць па класічнай тэорыі цеплаёмістасці ўдзельныя цеплаёмістасці крышталяў: 1) алюмінію; 2) медзі; 3) плаціны.

16.8. Выкарыстоўваючы класічную тэорыю цеплаёмістасці, вылічыць удзельныя цеплаёмістасці крышталяў KCl і CaCl<sub>2</sub>.



16.9. Таўшчыня драўлянай сцяны 10 см. Якой павінна быць таўшчыня цаглянай сцяны, каб яна мела такую ж цеплаправоднасць, як драўляная?

16.10. Дзве пласціны — медная і жалезная — аднолькавай таўшчыні ўшчыльную прылягаюць адна да адной. Тэмпература вонкавай паверхні меднай пласцінкі  $100^\circ\text{C}$ , жалезнай —  $0^\circ\text{C}$ . Знайсці тэмпературу ў месцы межавання пласцін.

16.11. Колькі трэба спаліць каменнага вугалю ў печы, ККДз якой 70 %, каб папоўніць страту цеплыні за суткі праз цагельную сцяну плошчай  $20\text{ м}^2$  і таўшчынёй 0,20 м, калі тэмпература ўнутранай паверхні сцяны  $20^\circ\text{C}$ , а знешняй  $10^\circ\text{C}$ ? Удзельная цеплыня згарання вугалю 30 МДж/кг.

16.12. Электрычная печ магутнасцю 2,0 кВт, плошча ўнутранай паверхні якой  $25\text{ дм}^2$ , пакрыта вогнетрывалым матэрыялам таўшчынёй 10 см. Каэфіцыент цеплаправоднасці вогнетрывалага матэрыялу  $0,80\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Якая тэмпература вонкавай паверхні печы, калі тэмпература ўнутранай яе паверхні  $1200^\circ\text{C}$ ?

16.13. Знайсці колькасць цеплыні, якая траціцца за час  $\tau = 1,0\text{ с}$  з плошчы  $S = 1,0\text{ м}^2$  цаглянай сцяны таўшчынёй  $l = 51\text{ см}$ , а таксама тэмпературу ўнутранай і вонкавай паверхняў сцяны, калі тэмпература ў пакоі  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , а тэмпература вонкавага паветра  $t_4 = -20^\circ\text{C}$ . Каэфіцыент цеплааддачы сцяны з боку пакою  $\alpha_1 = 12\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , а з вонкавага боку  $\alpha_2 = 6,0\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

16.14. Для памяншэння цеплавых страт сцяной будынку (гл. задачу 16.13) і павышэння тэмпературы ўнутранай паверхні сцяны выкарыстана ізаляцыя пласта корка таўшчынёй 5,0 см у двух варыянтах: 1) пласт корка пакрывае сцяну з унутранага боку будынка; 2) пласт корка пакрывае сцяну з вонкавага боку будынка. Вызначыць тэмпературу цаглянай сцяны з унутранага боку будынка ў абодвух варыянтах. Паказаць, які з варыянтаў з'яўляецца найвыгаднейшым і які працэнт цеплыні з яго дапамогай можна зберагчы.

16.15. Тэмпература газаў у топцы паравога катла  $t_1 = 800^\circ\text{C}$ . Тэмпература вады ў катле  $t_5 = 150^\circ\text{C}$ . Стальныя сценкі катла таўшчынёй  $l_1 = 2,5\text{ см}$  пакрыты з унутранага боку пластом накіпу таўшчынёй  $l_2 = 5,0\text{ мм}$ . Якая колькасць цеплыні перадаецца за 1,0 с праз паверхню катла плошчай  $1,0\text{ м}^2$ ? Каэфіцыент цеплааддачы сценкі з боку газаў  $\alpha_1 = 46\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , а з боку вады  $\alpha_2 = 2,3\text{ кВт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

16.16. Якой таўшчыні пласт сажы павінен пакрыць з вонкавага боку кацёл (характарыстыкі яго гл. у задачы 16.15), каб пры адсутнасці накіпу з унутранага боку катла колькасць цеплыні, перададзенай катлом, засталася без змянення?



## Фазавыя пераходы

16.17. Кавалак лёду знаходзіцца ў закрытай пасудзіне. На колькі трэба павысіць ціск ў пасудзіне, каб ціск насычанай пары, якая знаходзіцца над лёдам, павысіўся на 5 %? Тэмпература ў пасудзіне падтрымліваецца пастаяннай і роўнай  $-20^{\circ}\text{C}$ .

16.18. Вызначыць тэмпературу плаўлення лёду пры ціску 1,0 МПа. Лічыць, што пры змяненні ціску ад 0,10 да 1,0 МПа шчыльнасць лёду і вады і ўдзельная цеплыня плаўлення пастаянныя.

16.19. Вызначыць прырашчэнне энтрапіі пры зацвердзяванні ртуці масай 1,0 кг пры тэмпературы зацвердзявання  $-38,9^{\circ}\text{C}$ .

16.20. Кавалак лёду масай 0,30 кг, першапачатковая тэмпература якога 233 К, ператвораны ў пару пры тэмпературы 373 К і атмасферным ціску. Вызначыць прырашчэнне энтрапіі пры гэтым працэсе.

16.21. Струмень вадзяной пары пры тэмпературы  $100^{\circ}\text{C}$ , накіраваны на глыбу лёду масай 4,0 кг пры тэмпературы  $-20^{\circ}\text{C}$ , растапіў яе і нагрэў атрыманую ваду да  $60^{\circ}\text{C}$ . Знайсці адпаведнае прырашчэнне энтрапіі.

16.22. Вызначыць прырашчэнне энтрапіі пры плаўленні лёду ў колькасці 1 моль, калі вядома, што пры павелічэнні знешняга ціску на 10 МПа тэмпература плаўлення лёду змяняецца на 1 К.

16.23. Якое прырашчэнне тэмпературы кавалка лёду, які знаходзіцца пры нармальным умовах, калі яго адыябатна сціснуць да 10 МПа? Якая доля масы лёду пры гэтым расплавіцца?

16.24. Удзельная цеплыня выпарэння бензолу ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) паблізу яго трайнага пункту 0,43 МДж/кг. Чаму роўная яго ўдзельная цеплыня плаўлення пры гэтых умовах, калі тэмпература трайнага пункту і раўнаважны ціск пары ў гэтым пункце адпаведна роўныя  $6^{\circ}\text{C}$  і 4,8 кПа? Для крывой узгонкі ў трайным пункце  $\Delta p/\Delta T = 324 \text{ Па/К}$ .

## Раздзел III

# ЭЛЕКТРЫЧНАСЦЬ І МАГНЕТЫЗМ

## § 17. ЭЛЕКТРАСТАТЫКА

Закон Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1| |Q_2|}{r^2},$$

дзе  $r$  — адлегласць паміж зарадамі  $Q_1$  і  $Q_2$ ;  $\epsilon_0 = 8,85\pi \text{Ф/М}$  — электрычная пастаянная.

Модуль напружанасці і патэнцыял поля пунктавага зараду

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q|}{r^2}; \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

Сувязь паміж напружанасцю і патэнцыялам поля

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi.$$

Модуль напружанасці і патэнцыял поля пунктавага дыполя

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^2} \sqrt{1 + 3\cos^2\theta}; \quad \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3},$$

дзе  $p$  — электрычны момант дыполя;  $r$  — радыус-вектар, праведзены з цэнтра дыполя ў пункт, дзе вызначаецца  $E$  і  $\varphi$ ;  $\theta$  — вугал паміж вектарамі  $\vec{r}$  і  $\vec{p}$ .

Тэарэма Астраградскага—Гаўса і цыркуляцыя напружанасці  $\vec{E}$ :

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = Q/\epsilon_0; \quad \oint (\vec{E} \cdot d\vec{r}) = 0.$$

Модуль напружанасці электрычнага поля каля паверхні правадніка ў вакууме

$$E = \sigma/\epsilon_0,$$

дзе  $\sigma$  — паверхневая шчыльнасць зарадаў на правадніку.

Вектар  $D$  і тэарэма Астраградскага—Гаўса для яго:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}; \quad \oint \vec{D} d\vec{S} = Q,$$

дзе  $\vec{P}$  — палярызаванасць дыэлектрыка;  $Q$  — алгебраічная сума старонніх зарадаў унутры замкнутага паверхні.

Для ізатропных дыэлектрыкаў

$$\vec{P} = \kappa \epsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E},$$

дзе  $\kappa$  і  $\epsilon$  — дыэлектрычная ўспрымальнасць і дыэлектрычная пранікальнасць адпаведна.

Ёмістасць плоскага кандэнсатара

$$C = \epsilon_0 \epsilon S/d.$$

Электрычная энергія адасобленага зараджанага правадніка

$$E = \frac{1}{2} \varphi Q.$$

Энергія зараджанага кандэнсатара

$$E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2.$$

Аб'ёмная шчыльнасць энергіі электрычнага поля

$$\omega = \epsilon_0 \epsilon E^2 / 2.$$

## Закон Кулона

17.1. Два аднолькавыя па знаку зарады  $Q_1 = 0,7$  і  $Q_2 = 1,3$  нКл знаходзяцца ў паветры на адлегласці  $r = 6,0$  см адзін ад другога. На якой адлегласці паміж імі трэба змясціць трэці зарад, каб раўнадзеючая сіла на кожны зарад была роўная нулю?

17.2. Маятнік складаецца з металічнага шарыка, падвешанага на бязважкай нерасцяжнай непроводзячай ніці. Як зменіцца перыяд яго ваганняў, калі надаць шарыку зарад, а другі шарык, зараджаны адмоўна, змясціць унізе на адной вертыкалі з ніццю падвеса маятніка?

17.3. Два пунктавыя зарады  $Q = 1,1$  нКл кожны знаходзяцца на адлегласці  $r = 17,0$  см адзін ад другога. З якой сілай і ў якім напрамку яны дзейнічаюць на адзіночны дадатны зарад, які знаходзіцца на такой жа адлегласці ад кожнага з іх?

17.4. Аднайменныя зарады  $Q_1 = 0,2$  мКл,  $Q_2 = 0,5$  мКл і  $Q_3 = 0,4$  мКл размешчаны ў вяршынях трохвугольніка са старанамі  $a = 4,0$  см,  $b = 5,0$  см і  $c = 7,0$  см (рыс. 17.1). Вызначыць модуль і напрамак сілы, якая дзейнічае на зарад  $Q_3$ .

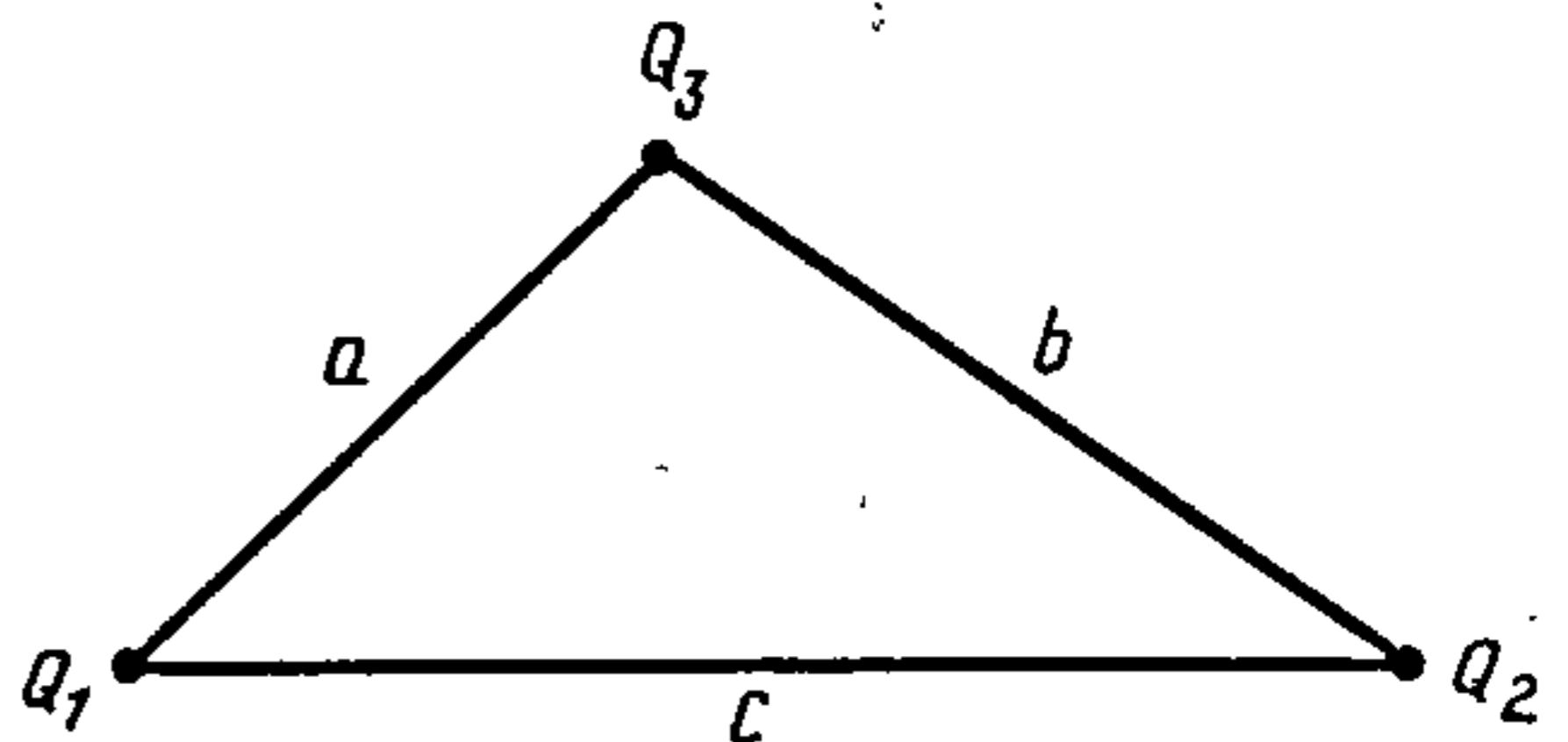
17.5. У цэнтры квадрата размешчаны дадатны зарад 250 нКл. Які адмоўны зарад трэба змясціць у кожнай вяршыні квадрата, каб сістэма зарадаў знаходзілася ў раўнавазе?

17.6. У вяршынях і цэнтры правільнага трохвугольніка са стараной 5,0 см размешчаны аднолькавыя дадатныя зарады 0,5 мКл кожны. Якая сіла дзейнічае на адмоўны зарад 0,7 мКл, які знаходзіцца на прадаўжэнні вышыні на адлегласці 7,0 см ад вяршыні? Разгледзець два выпадкі рашэнняў.

17.7. У вяршынях шасцівугольніка размешчаны аднолькавыя дадатныя зарады 10 нКл кожны. Які адмоўны зарад трэба памясціць у цэнтры шасцівугольніка, каб раўнадзеючая сіла да кожнага зараду была роўная нулю?

17.8. Шарык масай  $m$ , які мае зарад  $Q$ , знаходзіцца ўнутры гладкай сферы дыяметрам  $d$ . Які зарад трэба памясціць у ніжнім пункце сферы для таго, каб шарык знаходзіўся: 1) у раўнавазе; 2) ва ўстойлівай раўнавазе?

17.9. Шарык масай  $m = 4$  г, які мае



Рыс.17.1



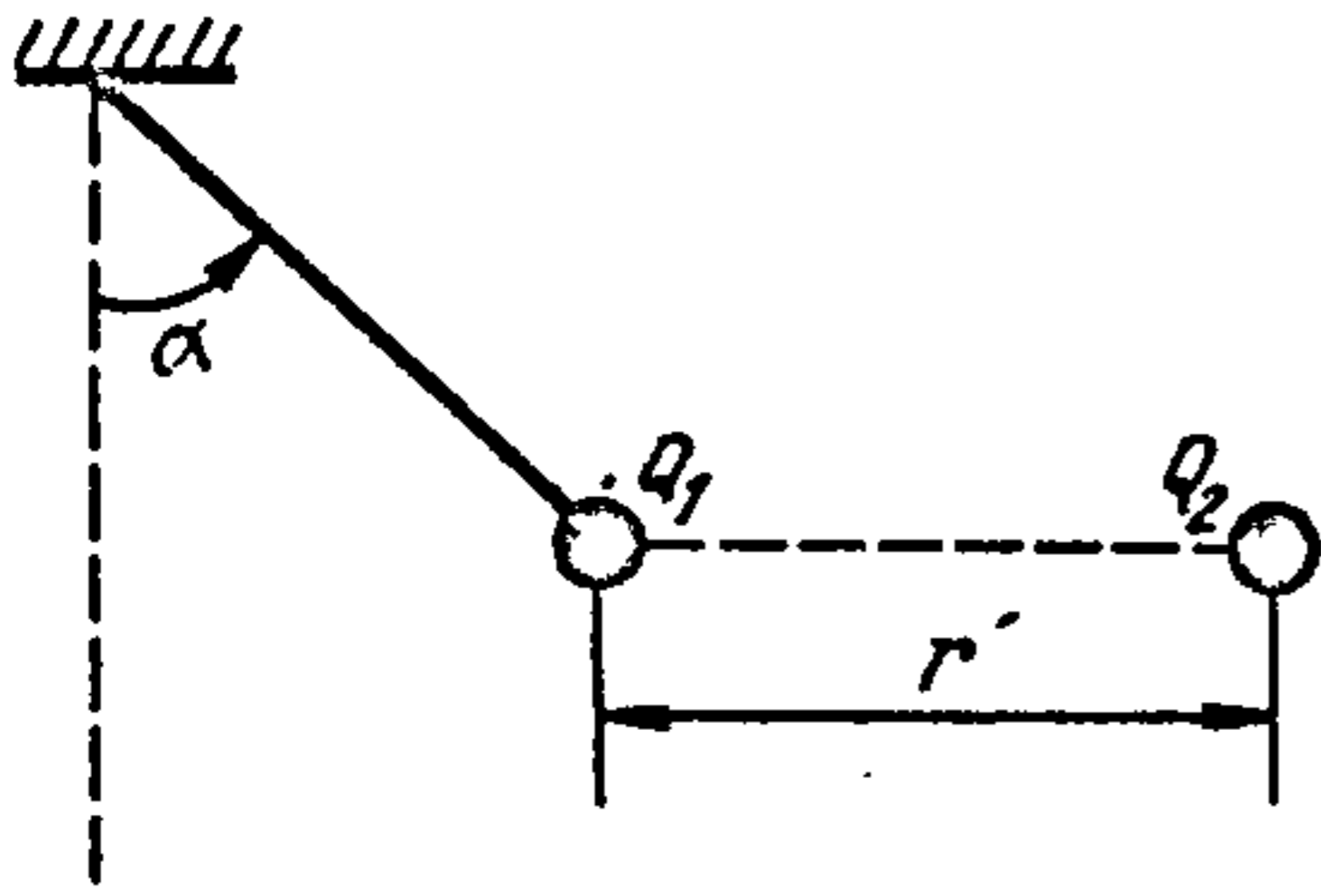


Рис.17.2

зарад  $Q_1 = 278$  нКл, падвешаны ў паветры на бязважкай нерасцяжнай непроводзячай ніці. Пры набліжэнні да яго зарада  $Q_2$  супрацьлеглага знака нітка адхілілася на вугал  $\alpha = 45^\circ$  ад вертыкальнага напрамку (рыс. 17.2). Знайсці зарад  $Q_2$ , калі адлегласць  $r = 6$  см.

17.10. Два аднолькавыя шарыкі масай  $m = 20$  мг кожны падвешаны ў паветры на бязважкіх нерасцяжных ніцях даўжынёй  $l = 0,2$  м, замацаваных у адным пункце падвесу. Адзін з шарыкаў адвялі ўбок і надалі яму зарад  $Q$ , затым адпусцілі. Пасля сутыкнення з другім шарыкам яны разышліся так, што ніці ўтварылі вугал  $\alpha = 60^\circ$ . Вызначыць зарад  $Q$ , нададзены першаму шарыку.

17.11. Тры шарыкі масай  $m = 5$  г кожны падвешаны ў паветры на бязважкіх нерасцяжных непроводзячых ніцях даўжынёй  $l = 1$  м да аднаго кручка. Пры наданні шарыкам аднолькавых па знаку зарадаў  $Q$  шарыкі разышліся так, што вугал паміж ніцямі стаў  $\alpha = 40^\circ$ . Вызначыць модуль зараду на шарыках.

17.12. У мадэлі атама Бора—Рэзерфорда электроны рухаюцца па кругавых арбітах вакол дадатна зараджанага ядра. Вызначыць скорасць  $v$  і паскарэнне  $a$  электрона ў атаме вадароду, калі радыус бораўскай арбіты  $r = 52,9$  пм.

17.13. Зараджаны шарык масай  $m = 10$  г, падвешаны ў паветры на бязважкай нерасцяжнай непроводзячай ніці, якая ўтварае вугал  $\alpha = 45^\circ$  з вертыкаллю, рухаецца з пастаяннай вуглавой скорасцю  $\omega = 10$  рад/с па акружнасці радыусам  $r = 5$  см (рыс. 17.3). У пункце  $B$  знаходзіцца другі нерухомы зараджаны шарык, прычым адлегласць  $AO = OB$ . Знайсці модуль зарадаў шарыкаў  $Q$ , лічачы гэтыя зарады аднолькавымі.

17.14. Зараджаная часцінка масай  $m$ , якая мае зарад  $Q_1$ , рухаецца вакол замацаванага пунктавага зараду  $Q_2$  па эліптычнай арбіце (рыс. 17.4). Мінімальная адлегласць паміж зарадам  $Q_2$  і часцінкай  $Q_1$  роўная  $r$ , максімальная —  $R$ . Чаму роўны перыяд  $T$  абароту часцінкі вакол зарада  $Q_2$ ?

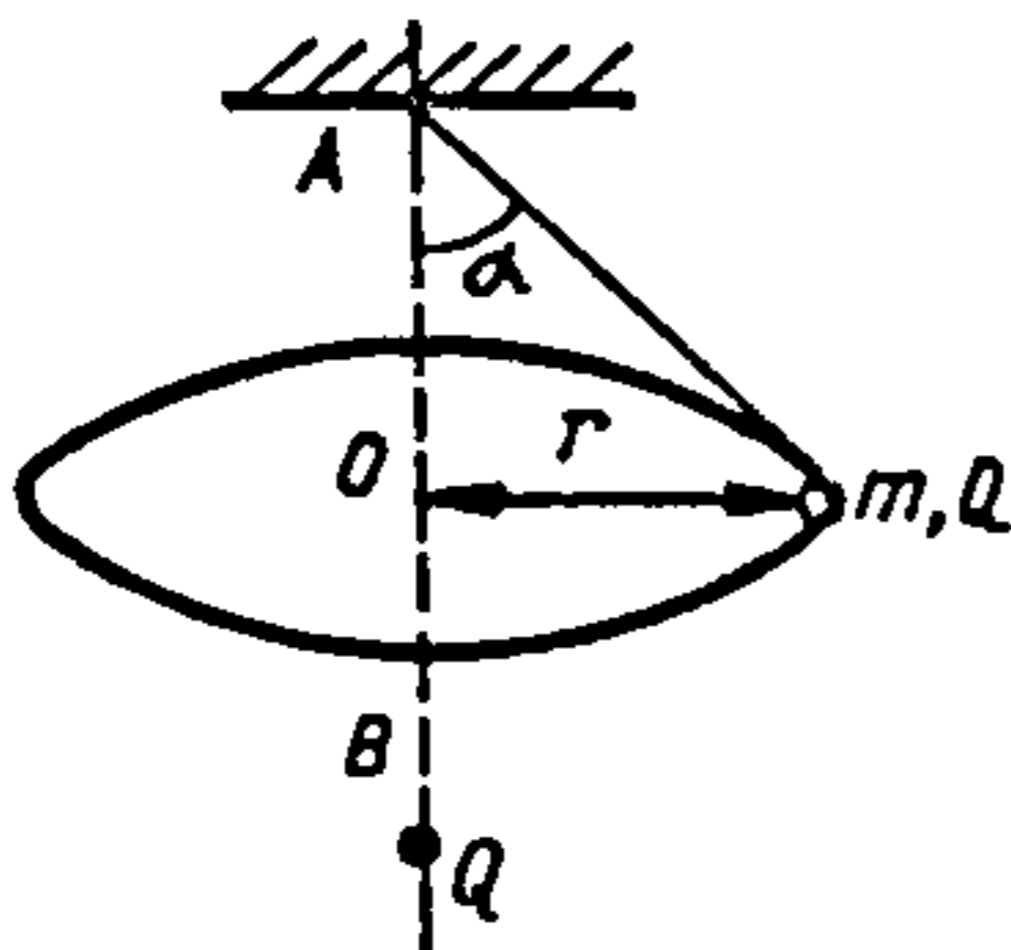


Рис.17.3

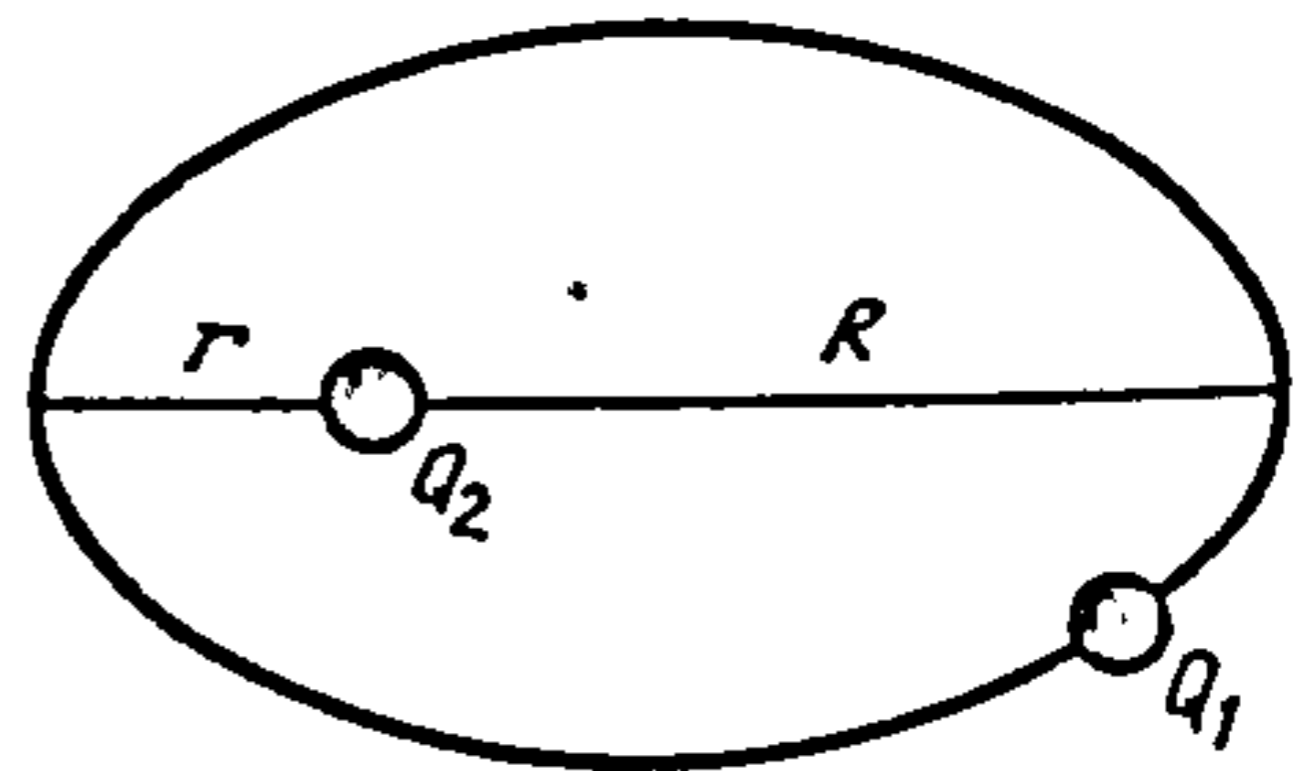
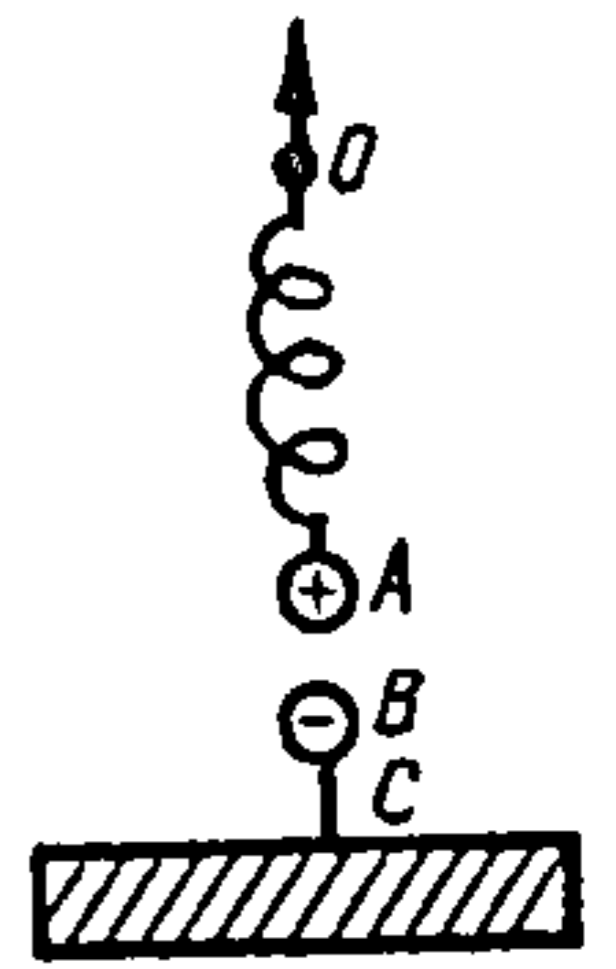


Рис.17.4

17.15. Два шарыкі  $A$  і  $B$  масай  $m = 0,1$  кг кожны маюць аднолькавыя па модулі і супрацьлеглыя па знаку зарады  $Q = \pm 10$  мкКл. Шарык  $A$  падвешаны на ізаляванай спружыне жорсткасцю  $k = 9,8$  Н/м над шарыкам  $B$  (рыс. 17.5). У пачатковым становішчы сіла кулонаўскага ўзаемадзеяння шарыкаў  $4mg$ . Верхні канец спружыны павольна падымаюць. На колькі трэба перамясціць пункт  $O$ , каб нацяжэнне бязважкай нерасцяжнай непроводзячай ніці  $BC$  стала роўным нулю?



Рыс.17.5

17.16. На тонкай ніці даўжынёй  $l = 8$  см раўнамерна размеркаваны зарад  $Q_1 = 350$  мкКл, які дзейнічае з сілай  $F = 120$

мкН на пунктавы зарад  $Q_2$ , што знаходзіцца на прадаўжэнні той жа ніці на адлегласці  $r = 6$  см ад яе сярэдзіны. Вызначыць модуль пунктавага зараду  $Q_2$ , калі ўся сістэма знаходзіцца ў паветры.

17.17. Кольцу з дроту радыусам  $R = 5$  см надалі зарад  $Q_1 = 40$  нКл. З якой сілай  $F_n$  будзе расцягвацца кольца, калі ў яго цэнтры памясціць аднайменны зарад  $Q_2 = 30$  нКл? Сілы, якія расцягваюць кольца ўласным полем, не ўлічваць.

17.18. Па тонкім кольцы з дрота радыусам  $R = 6$  см раўнамерна размеркаваны зарад  $Q = 10$  нКл. Вызначыць сілу  $F$ , што дзейнічае на пунктавы зарад  $Q_1 = 3$  нКл, які знаходзіцца на адлегласці  $r = 5$  см ад цэнтра кольца на прамой, перпендыкулярнай да плоскасці кольца і праходзячай праз яго цэнтр.

17.19. Шарык масай  $m = 1,0$  г, які мае зарад  $Q = 90$  нКл, прымацаваны да аднаго канца бязважкай нерасцяжнай непроводзячай ніці. Другі канец ніці прымацаваны да самага высокага пункта кольца радыусам  $R = 5,0$  см, якое знаходзіцца ў вертыкальнай плоскасці. Кольца зроблена з цвёрдага дроту, дыяметр якога можна не ўлічваць. На кольцы раўнамерна размеркаваны зарад  $Q_1 = 90$  нКл таго ж знаку, што і на шарыку. Вызначыць даўжыню ніці  $l$ , пры якой пасля адхілення шарык апынецца на восі кольца, перпендыкулярнай да яго плоскасці і праходзячай праз цэнтр.

17.20. Гарызантальна размешчанае тонкае кольца радыусам  $R = 20$  см раўнамерна зараджана зарадам лінейнай шчыльнасцю  $\tau = 0,10$  мкКл/см. З цэнтра кольца вертыкальна ўніз падае цела масай  $m = 5$  г, якое мае зарад  $Q_1 = -10$  нКл. Вызначыць паскарэнне  $a$  цела ў той момант, калі яно будзе знаходзіцца на адлегласці  $h = 30$  см ад плоскасці кольца для выпадку дадатнага зараду  $Q_1$ .

### Напружанасць і патэнцыял поля

17.21. У аднародным электрычным полі, сілавая лінія якога гарызантальная, на тонкай бязважкай нерасцяжнай ніці даўжынёй  $l = 35$  см падвешаны шарык масай  $m = 15$  г, які мае зарад  $Q = 3,0$  мкКл. Знайсці



перыяд уласных ваганняў шарыка, калі напружанасць электрычнага поля  $E = 40$  кВ/м.

17.22. Шарык масай  $m = 1,0$  г, які мае зарад  $Q = 1,0$  мкКл і падвешаны на бязважкай нерасцяжнай непроводзячай ніці, знаходзіцца ў аднародным электрычным полі. Сілавая лінія гэтага поля гарызантальная і накіраваная злева направа. Шарык адведзены ўлева так, што ніць адхілілася на вугал  $\alpha = 45^\circ$  ад вертыкалі, і адпушчаны. Знайсці напружанасць поля  $E$ , калі сіла нацяжэння ніці пры праходжанні шарыкам вертыкальнага становішча роўная  $F_n = 80$  мН.

17.23. Шарык масай  $m = 2,0$  г, што нясе зарад  $Q = 8,0$  мкКл, падвешаны на бязважкай нерасцяжнай непроводзячай ніці даўжынёй  $l = 1,2$  м і робіць кругавы рух вакол вертыкальнай восі так, што вугал, на які ніць адхіляецца ад вертыкалі,  $\alpha = 20^\circ$ . Знайсці перыяд абароту шарыка, калі сілавая лінія электрычнага поля напружанасцю  $E = 1,4$  кВ/м вертыкальная і накіраваная ўверх.

17.24. Пунктавыя зарады  $Q_1 = 20$  нКл і  $Q_2 = -10$  нКл знаходзяцца ў паветры на адлегласці  $r = 10$  см адзін ад другога. Вызначыць напружанасць поля  $E$  ў пункце, аддаленым на адлегласць  $r_1 = 8$  см ад першага і  $r_2 = 7$  см ад другога зарадаў.

17.25. Электрычны дыполь з зарадамі  $Q_1 = 90$  і  $Q_2 = -90$  кКл і адлегласцю паміж імі  $l = 10$  см знаходзіцца ў паветры. Вызначыць напружанасць поля: на восі дыполя на адлегласці  $l/4$  ад аднаго з яго зарадаў; у цэнтры дыполя; на перпендыкуляры да восі дыполя, які праходзіць праз адзін з яго зарадаў, на адлегласці  $l/2$ ; на перпендыкуляры да восі дыполя, устаноўленым на сярэдзіне яго, на адлегласці  $l/2$ . Пабудаваць графік  $E = f(l)$  размеркавання поля паміж зарадамі.

17.26. Два пунктавыя дадатныя зарады  $Q_1 = Q_2 = Q$  знаходзяцца ў паветры на адлегласці  $l = 5$  см адзін ад другога. Знайсці на восі сіметрыі гэтых зарадаў пункт, у якім напружанасць электрычнага поля  $E$  максімальная.

17.27. Мыльная бурбалка, якая вісіць на канцы тонкай трубкі, пры адкрытай трубцы сцягваецца пад дзеяннем сіл паверхневага нацяжэння. Ці можна захаваць бурбалку ад поўнага сціскання, надаючы ёй вялікі электрычны зарад? (Пры гэтым варта мець на ўвазе абмежаваную дыэлектрычную моц паветра, роўную  $E = 3$  МВ/м.) Калі можна, то які дыяметр будзе мець мыльная бурбалка?

17.28. Два полыя металічныя шарыкі размеркаваныя канцэнтрычна. Зарад меншага шарыка 2 нКл, а большага 5 нКл. Знайсці напружанасць поля: унутры меншага шарыка; у пункце, які знаходзіцца паміж шарыкамі на адлегласці 7 см ад агульнага цэнтра; у пункце, які знаходзіцца па-за шарыкамі на адлегласці 15 см ад агульнага цэнтра.

17.29. Доўгі тонкі прамы стрыжань, які знаходзіцца ў вакууме, раўнамерна зараджаны зарадам лінейнай шчыльнасцю  $\tau = 1$  нКл/м. Вызна-



чыць напружнасць электрычнага поля на адлегласці  $r = 2,0$  м ад стрыжня.

17.30. Два бясконца доўгія паралельныя стрыжні, якія знаходзяцца ў вакууме на адлегласці  $l = 2$  м адзін ад другога, зараджаны раўнамерна зарадам лінейнай шчыльнасцю  $\tau = 15$  нКл/м. Вызначыць сілу, якая дзейнічае на адзінку даўжыні стрыжня.

17.31. Заряд  $Q = 20$  нКл раўнамерна размеркаваны на тонкай ніці даўжынёй  $l = 1$  м. Вызначыць напружанасць поля  $E$  у пункце, які знаходзіцца на адлегласці  $r = 10$  см ад ніці і роўнаадалены ад яе канцоў.

17.32. Тонкае паўкольца радыусам  $R$  раўнамерна зараджана зарадам лінейнай шчыльнасцю  $\tau$  і знаходзіцца ў вакууме. Вызначыць напружанасць поля  $E$  ў цэнтры крывізны.

17.33. Тонкае кольца радыусам  $R$  раўнамерна зараджана зарадам лінейнай шчыльнасцю  $\tau$ . Вызначыць напружанасць электрычнага поля ў вакууме: 1) на адлегласці  $h$  ад цэнтра кольца на восі, якая перпендыкулярна яго плоскасці і праходзіць праз цэнтр; 2) у цэнтры кольца. На якой адлегласці ад цэнтра кольца на восі напружанасць поля будзе максімальнай? Мінімальнай?

17.34. Заряд  $Q = 10$  нКл раўнамерна размеркаваны па дузе акружнасці, радыус якой  $R = 1$  см, з вуглом росту: 1)  $\pi$  рад; 2)  $2\pi/3$  рад. Вызначыць напружанасць электрычнага поля ў цэнтры акружнасці.

17.35. Тонкі аднародны дыск радыусам  $R$ , што размешчаны гарызантальна, зараджаны раўнамерна зарадам паверхневай шчыльнасцю  $\sigma$ . Вызначыць напружанасць электрычнага поля ў вакууме: 1) на адлегласці  $h$  ад цэнтра дыска на восі, якая перпендыкулярна плоскасці дыска і праходзіць праз цэнтр; 2) у цэнтры дыска. На якой адлегласці ад цэнтра дыска на восі сіметрыі напружанасць поля будзе максімальнай? Мінімальнай?

17.36. Заряд  $Q = 9$  пКл раўнамерна размеркаваны на паверхні дыска радыусам  $R = 4$  см, які знаходзіцца ў вакууме. Знайсці напружанасць поля  $E$  у пункце, які ляжыць на перпендыкуляры, што праходзіць праз цэнтр дыска і адстаіць на адлегласці  $l = 3$  см ад яго.

17.37. Вызначыць патэнцыял поля ў цэнтры плоскага кольца са знешнім радыусам  $R_2 = 40,0$  см і ўнутраным  $R_1 = 20,0$  см, калі на ім раўнамерна размеркаваны зарад  $Q = 0,6$  мкКл.

17.38. Дзве бясконца доўгія паралельныя ніці зараджаны рознаіменнымі зарадамі і маюць аднолькавую лінейную шчыльнасць зарадаў  $\tau$ . Вызначыць патэнцыял поля ў пункце, які ляжыць на адлегласцях  $r_1$  і  $r_2$  ад гэтых ніцей.

17.39. Тонкае плоскае кольца, унутраны і знешні радыусы якога роўныя адпаведна  $R_1$  і  $R_2$ , зараджана электрычным зарадам паверхневай шчыльнасцю  $\sigma$ . Вызначыць патэнцыял поля ў пункце, які ляжыць на перпендыкуляры, праведзеным праз цэнтр кольца, і адстаіць на адлегласці  $r$  ад цэнтра гэтага кольца.

17.40. Шарык радыусам  $R_0 = 0,2$  см, які мае зарад  $Q = 18$  пКл, знаходзіцца

ў паветры. Знайсці радыусы эквіпатэнцыяльных паверхняў, патэнцыялы якіх адрозніваюцца адзін ад аднаго на  $\Delta\varphi = 15$  В. Уплыў іншых зараджаных цел не ўлічваць.

17.41. Шарык радыусам 1 см з раўнамерна размеркаваным на яго паверхні зарадам  $Q$  знаходзіцца ў паветры. Лічачы патэнцыял бясконцасці роўным нулю і не звяртаючы ўвагі на ўплыў іншых зараджаных прадметаў, вызначыць радыусы эквіпатэнцыяльных паверхняў, патэнцыялы якіх адрозніваюцца адзін ад аднаго на 0,1 патэнцыяла на паверхні шарыка.

17.42. У аднародным электрычным полі выбраны пункты  $A, B, C, D$  і  $E$ , якія размешчаны на роўных адлегласцях адзін ад другога. Знайсці патэнцыялы пунктаў  $B$  і  $D$ , прымаючы па чарзе  $A, C$  і  $E$  за пункты нулявога патэнцыялу, калі рознасць патэнцыялаў паміж пунктамі  $B$  і  $D$  роўная 50 В.

17.43. Эквіпатэнцыяльная лінія праходзіць праз пункт поля напружанасцю  $E_1 = 5,0$  кВ/м, які адстаіць на адлегласці  $l = 2,5$  см ад зараду, што стварае поле. На якой адлегласці ад гэтага зараду патрэбна правесці другую эквіпатэнцыяльную лінію, каб напружанне паміж лініямі было  $\Delta U = 25,0$  В?

17.44. Знайсці патэнцыял  $\varphi$  кроплі ртуці, што атрымалася ў выніку зліцця  $n$  аднолькавых шарападобных кропель ртуці, якія маюць адзін і той жа патэнцыял  $\varphi_1$ .

17.45. Заряд 0,5 нК раўнамерна размеркаваны на паверхні лага металічнага шарыка радыусам 2,5 см. Знайсці патэнцыял электрычнага поля ў цэнтры, на паверхні шарыка і на адлегласці 5,0 см ад цэнтра. Пабудаваць графік залежнасці патэнцыяла поля ад адлегласці да цэнтра шарыка.

17.46. Пунктавыя зарады  $Q_1 = -17$  нКл і  $Q_2 = 20$  нКл знаходзяцца ад пунктавога зараду  $Q_3 = 30$  нКл на адлегласці адпаведна  $l_1 = 2$  см і  $l_2 = 5$  см. Якую мінімальную работу супраць электрычных сіл патрэбна здзейсніць, каб памяняць месцамі зарады  $Q_1$  і  $Q_2$ ?

17.47. Зараджаны шарык масай  $m = 1$  г падвешаны ў паветры на бязважкай нерасцяжнай ніці. Здалёку павольна набліжаюць другі зараджаны шарык і змяшчаюць яго ў той пункт, у якім першапачаткова знаходзіўся першы шарык на ніці, пры гэтым ён падымаецца на вышыню  $h = 1$  см. Вызначыць работу, здзейсненую сіламі пры перамяшчэнні другога шарыка.

17.48. Шарык з зарадам  $Q = 1$  мкКл падвешаны на бязважкай ізаляванай спружыне жорсткасцю  $k = 9$  Н/м. З бясконцасці павольна набліжаюць другі шарык з такім жа зарадам і змяшчаюць яго ў той пункт, дзе першапачаткова знаходзіўся шарык на спружыне. Якую работу здзейснілі пры гэтым электростатычныя сілы?

### Праваднікі і дыэлектрыкі ў электрычным полі

17.49. Вопыт Кавендыша заключаецца ў вымярэнні электрычнага поля ўнутры зараджанай металічнай сферы. Паказаць, карыстаючыся законам Кулона і прынцыпам суперпазіцыі, што напружанасць поля ўнутры зара-



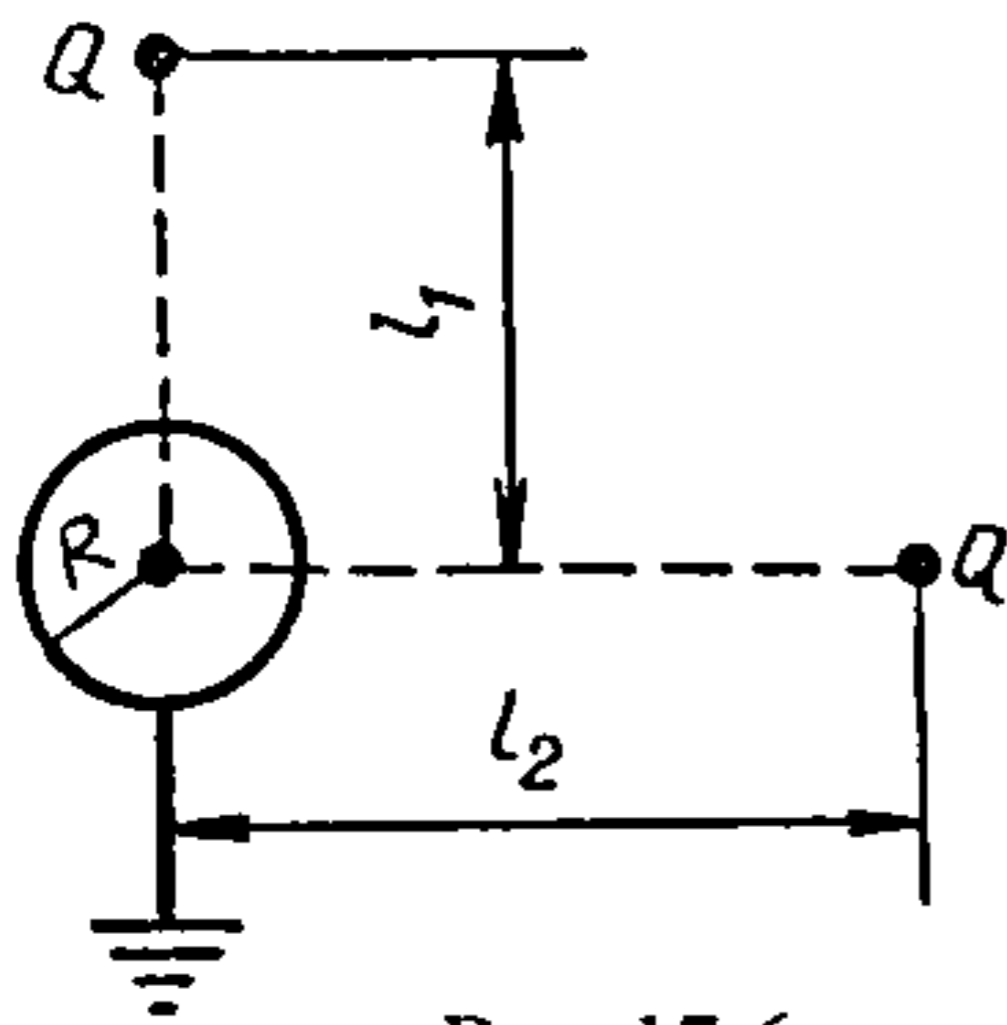


Рис.17.6

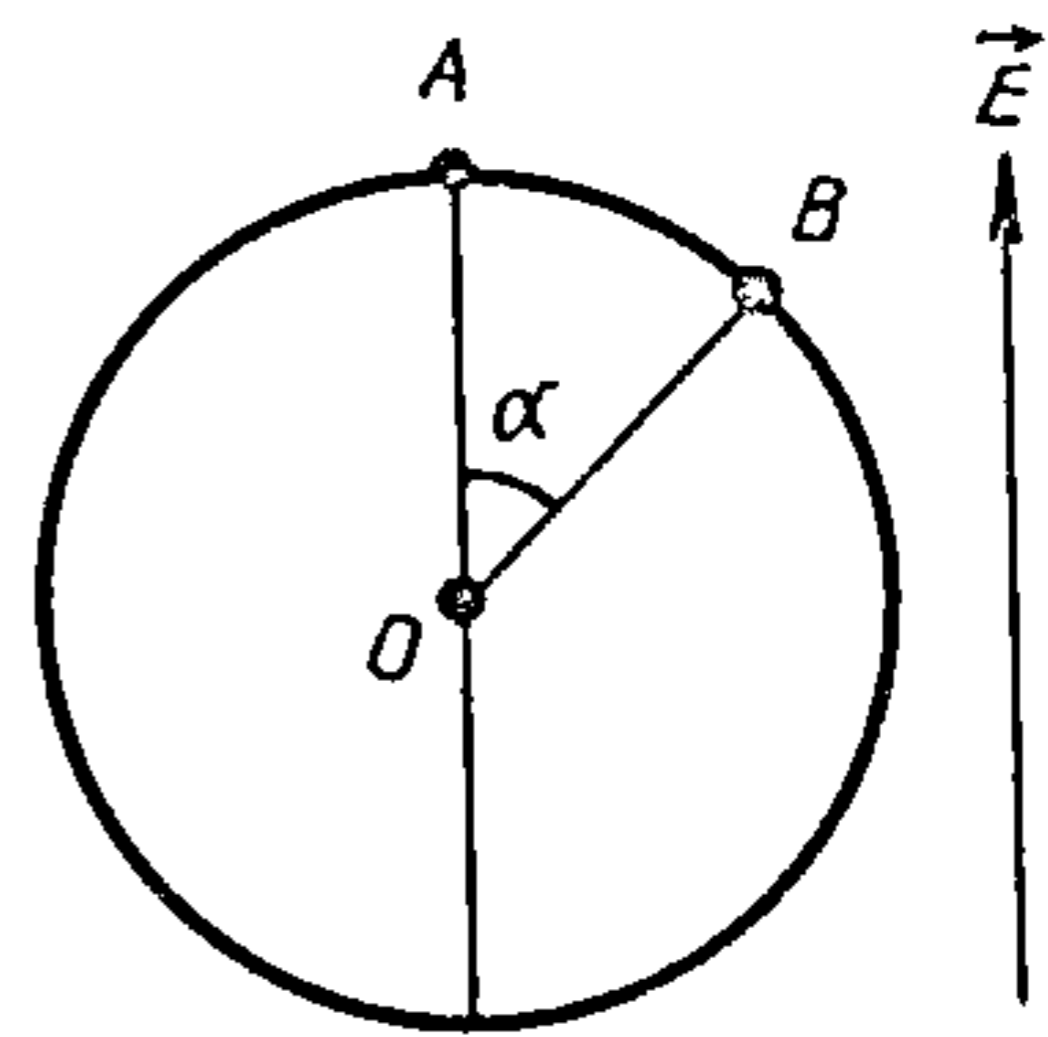


Рис.17.7

джанай металічної сфери роўная нулю.

17.50. Аднолькавыя зарады  $Q$  знаходзяцца на адлегласцях  $l_1$  і  $l_2$  ад заземленай металічнай сферы малога радыуса  $R$  (рыс. 17.6). Адлегласць да паверхні Зямлі і іншых заземленых прадметаў наможа большая за  $l_1$  і  $l_2$ . Знайсці сілу, з якой зарады дзейнічаюць на сферу.

17.51. Знайсці зарад  $Q_1$  заземленага металічнага шарыка радыусам  $R$ , калі на адлегласці  $r$  ад яго цэнтра знаходзіцца пунктавы зарад  $Q$ .

17.52. Маленькі шарык, які мае зарад  $Q = 20$  нКл, знаходзіцца ў вакууме на адлегласці  $l = 5$  см ад цэнтра да заземленай плоскай металічнай сценкі. З якой сілай яны ўзаемадзейнічаюць?

17.53. На адлегласці  $r$  ад цэнтра шарыка знаходзіцца пунктавы зарад  $Q$ . Чаму роўны патэнцыял  $\varphi$  шарыка?

17.54. Унутр полай праводзячай сферы радыусам  $R$ , якая мае зарад  $+Q$ , праз маленькую адтуліну ўнеслі цела з зарадам  $-Q$ . Чаму роўны патэнцыял пункта, які знаходзіцца на адлегласці  $r > R$  ад цэнтра сферы?

17.55. У цэнтры металічнай сферы змешчаны пунктавы зарад  $Q_1$ . Вызначыць электрычнае поле ўнутры і па-за сферай у выпадку, калі абалонка: не зараджана; заземлена.

17.56. У аднароднае электрычнае поле напружанасцю  $\vec{E}$  унеслі металічны шарык. Вядома, што шчыльнасць паверхневых зарадаў на «полюсе» шарыка ў пункце  $A$  (рыс. 17.7) роўная  $\sigma_0$ . Вызначыць шчыльнасць паверхневых зарадаў у пункце  $B$ , калі радыус, праведзены з цэнтра ў гэты пункт шарыка, складае вугал  $\alpha$  з вектарам  $\vec{E}$  знешняга электрычнага поля.

17.57. Два металічныя шарыкі радыусам  $r = 1$  см кожны знаходзяцца ў вакууме. Адлегласць паміж іх цэнтрамі роўная  $l = 2$  м. Вызначыць рознасць патэнцыялаў паміж шарыкамі, калі кожнаму шарыку нададзены супрацьлеглы па знаку зарад  $Q = 2$  нКл.

17.58. Дзве металічныя пласціны, якія знаходзяцца ў вакууме на малой адлегласці, размешчаны паралельна (рыс. 17.8). Пласціне 1 надаюць зарад  $Q$ , пласціна 2 незараджана. Плошчы пласцін аднолькавыя і роўныя  $S$ . Знайсці паверхневую шчыльнасць зарадаў на абодвух

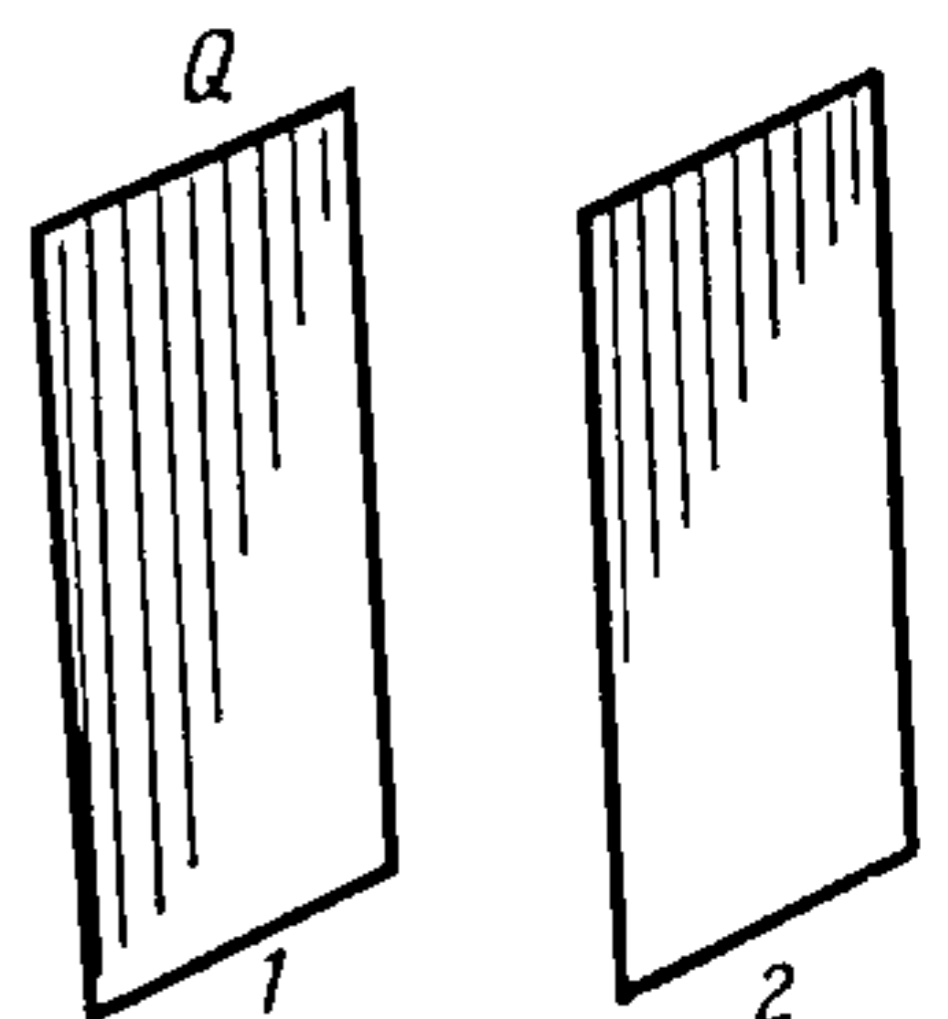
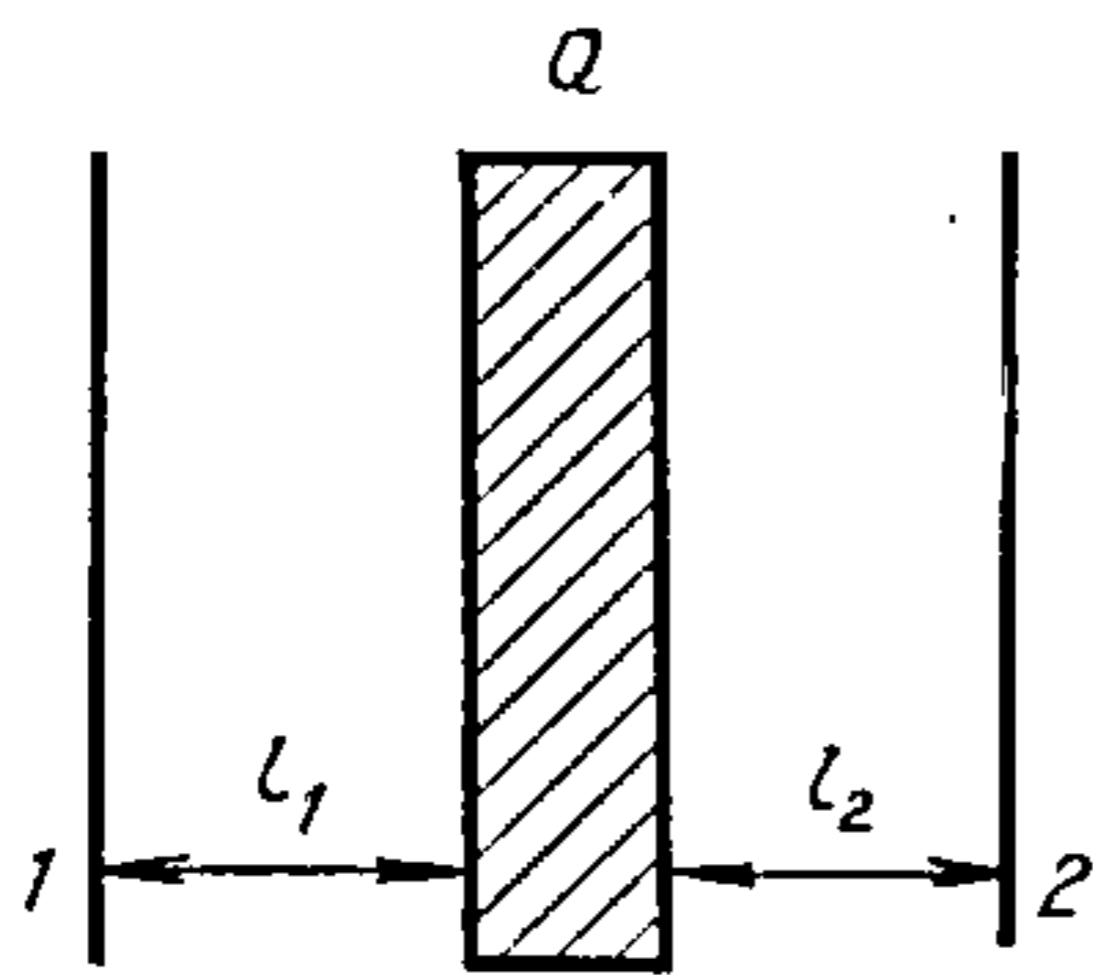
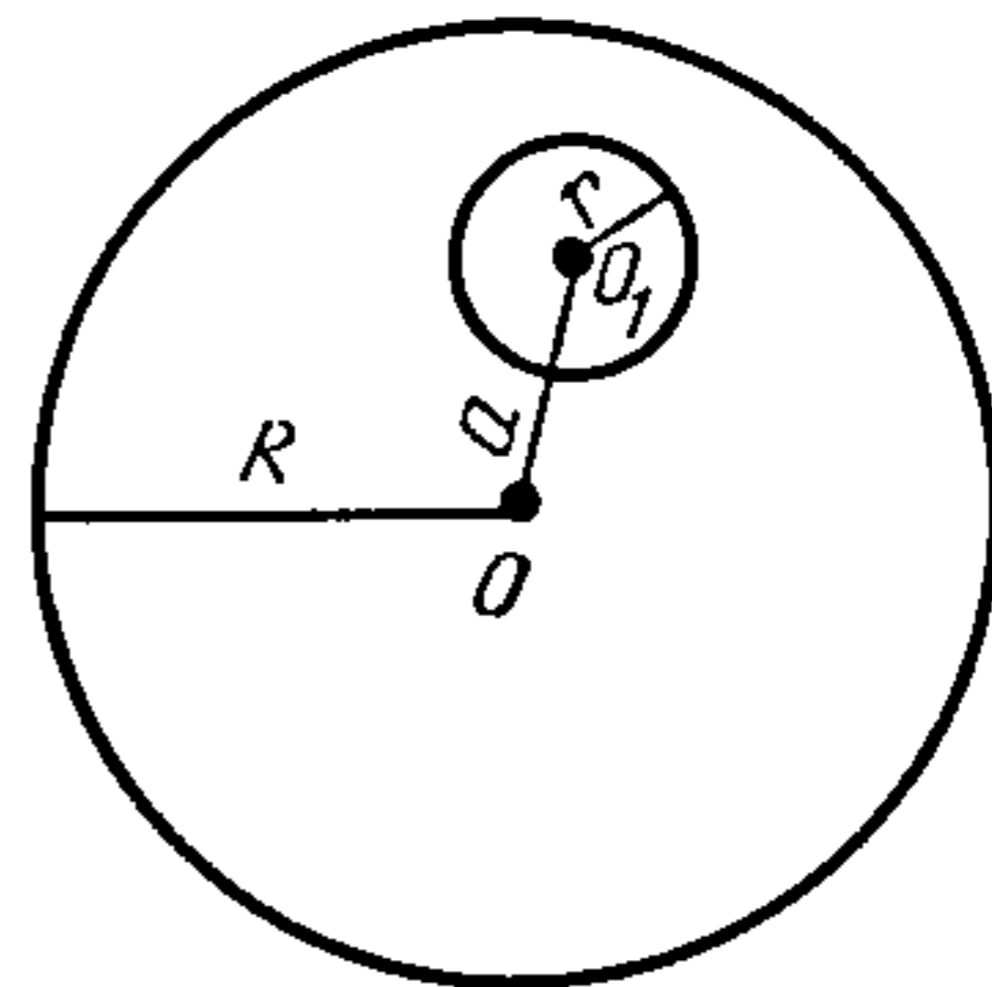


Рис.17.8





Рыс.17.9



Рыс.17.10

баках пласцін.

17.59. У прастору паміж пласцінамі незараджанага плоскага кандэнсатара ўносяць металічную пласціну, якая мае зарад  $Q$ , так, што паміж пласцінай і абкладкамі кандэнсатара застаюцца зазоры  $l_1$  і  $l_2$  (рыс. 17.9). Плошчы пласцін аднолькавыя і роўныя  $S$ . Вызначыць рознасць патэнцыялаў паміж абкладкамі кандэнсатара.

17.60. У аднародна зараджаным шарыку радыусам  $R$  ёсць сферычная поласць радыусам  $r$ , цэнтр якой знаходзіцца на адлегласці  $a$  ад цэнтра шарыка (рыс. 17.10). Знайсці напружанасць электрычнага поля ў розных пунктах поласці, калі шчыльнасць зараду на шарыку роўная  $\rho$ .

17.61. Палярную малекулу можна ўявіць у выглядзе цвёрдай гантэлі даўжынёй  $l = 10,00$  нм з шарыкамі на канцах масай  $m = 10^{-24}$  г кожны, якія нясуць зарады  $+Q$  і  $-Q$  ( $|Q| = 0,16$  аКл). Вызначыць перыяд ваганняў палярнай малекулы ў аднародным электрычным полі, напружанасць якога  $E = 0,30$  кВ/см.

17.62. Шарык радыусам  $R = 5$  см, які мае зарад  $Q_1 = 210$  нКл, знаходзіцца ўнутры дыэлектрыка дыэлектрычнай пранікальнасцю  $\epsilon = 7$ . Вызначыць модуль і знак палярызацыйнага зараду, які ўзнікае ў дыэлектрыку ля паверхні зараджанага шарыка і экранізуе сваім полем дзеянне зараду шарыка, а таксама шчыльнасць размеркавання палярызацыйнага зараду.

17.63. Металічны шарык радыусам 2 см, які мае зарад 12 нКл, акружаны слоem дыэлектрыка таўшчынёй 7 см дыэлектрычнай пранікальнасцю  $\epsilon = 3$ . Знайсці напружанасць поля ў пунктах, якія ляжаць на адлегласці 5 і 11 см ад цэнтра шарыка. Пабудаваць графік залежнасці напружанасці поля ад адлегласці да цэнтра шарыка.

17.64. Паміж пласцінамі плоскага кандэнсатара, зараджанага да напружання  $U = 400$  В, змешчана дыэлектрычная пласціна таўшчынёй  $h = 1,2$  см і дыэлектрычнай пранікальнасцю  $\epsilon = 5$ . Знайсці: 1) паверхневую шчыльнасць  $\sigma$  свабодных зарадаў на абкладках кандэнсатара; 2) паверхневую шчыльнасць  $\sigma'$  звязаных зарадаў (зарадаў палярызацыі) на пласціне.

17.65. Зарад  $Q = 0,4$  мкКл раўнамерна размеркаваны ў аб'ёме шарыка радыусам  $r = 3,0$  см. Знайсці напружанасць, электростатычную індукцыю і патэнцыял поля на адлегласцях  $r_1 = 2,0$  см і  $r_2 = 4,0$  см ад цэнтра шарыка.

Пабудаваць графік залежнасці напружанасці і патэнцыяла поля ад адлегласці да цэнтра шарыка. Дыэлектрычная пранікальнасць матэрыялу шарыка  $\epsilon = 5$ .

17.66. Сферычны слой, абмежаваны радыусамі  $R_1 = 3$  см і  $R_2 = 5$  см, раўнамерна зараджаны зарадам шчыльнасцю  $\rho = 3$  мкКл/м<sup>3</sup>. Дыэлектрычная пранікальнасць слою  $\epsilon_1 = 5$ , а акружаючага асяроддзя  $\epsilon_2 = 2,5$ . Знайсці індукцыю і напружанасць электрычнага поля: 1) у цэнтры слою; 2) паміж паверхнямі слою на адлегласці  $r = 4$  см ад цэнтра; 3) па-за слоём на адлегласці  $l = 4$  см ад знешняй паверхні. Пабудаваць графік залежнасці напружанасці поля ад адлегласці да цэнтра сферычнага слою. Чаму роўная рознасць патэнцыялу паміж паверхнямі слою?

### Электраёмістасць

17.67. Аднаму шарыку надалі зарад  $Q_1 = 13$  нКл, другому —  $Q_2 = 18$  нКл, затым шарыкі злучылі правадніком. Знайсці канчатковае размеркаванне зарадаў на шарыках, якія знаходзяцца далёка адзін ад другога. Радыус першага шарыка  $R_1 = 8$  см, другога —  $R_2 = 18$  см. Ёмістасць падводзячага правадніка не ўлічваць.

17.68. Два зараджаныя шарыкі радыусамі  $R_1$  і  $R_2$ , якія маюць зарады  $Q_1$  і  $Q_2$  адпаведна, знаходзяцца адзін ад другога на адлегласці, намогата большай за іх радыусы. Знайсці зарады  $Q_1'$  і  $Q_2'$  і патэнцыял  $\varphi$  шарыкаў пасля таго, як іх злучылі правадніком.

17.69. Металічны шарык радыусам  $R_1 = 5$  см зараджаны да  $\varphi = 150$  В. Чаму роўная напружанасць поля ў пункце, які знаходзіцца на адлегласці  $l = 10$  см ад паверхні шарыка? Як зменіцца напружанасць поля, калі шарык злучыць з другім незараджаным шарыкам, радыус якога  $R_2 = 10$  см, а затым другі шарык аддаліць на бясконца вялікую адлегласць?

17.70. Адною з пласцін плоскага кандэнсатара ёмістасцю  $C$  надалі зарад  $+Q$ , другой  $+4Q$ . Знайсці рознасць патэнцыялаў паміж пласцінамі кандэнсатара.

17.71. Паміж пласцінамі плоскага кандэнсатара (плошча кожнай пласціны  $90$  см<sup>2</sup>) знаходзіцца шкляная пласціна таўшчынёй  $2$  мм. Вызначыць ёмістасць кандэнсатара.

17.72. Вылічыць ёмістасць цыліндрычнага кандэнсатара, калі яго даўжыня  $50$  см, радыус унутранага цыліндра  $4$  см, знешняга  $9$  см і поласць паміж цыліндрамі на ўсёй даўжыні кандэнсатара запоўнена трансфарматарным маслам.

17.73. Знайсці ўнутраны радыус цыліндрычнага бакалітавага кандэнсатара ( $\epsilon = 6$ ) ёмістасцю  $1,5$  мкФ, калі знешні радыус  $10,0$  см, даўжыня кандэнсатара  $20,0$  см.

17.74. Два кандэнсатары ёмістасцю  $C_1$  і  $C_2$ , разлічаныя на максімальнасць



напружанне  $U_1$  і  $U_2$  адпаведна, злучаны паслядоўна. Якое напружанне можна падаць на гэтую сістэму кандэнсатараў?

17.75. Кандэнсатары ёмістасцю  $C_1 = 1$  мкФ і  $C_2 = 2$  мкФ зараджаны да рознасці патэнцыялаў  $\Delta\varphi_1 = 10$  В і  $\Delta\varphi_2 = 50$  В адпаведна. Пасля зарадкі кандэнсатары злучылі аднайменнымі полюсамі. Вызначыць рознасць патэнцыялаў  $\Delta\varphi$  паміж абкладкамі кандэнсатараў пасля іх злучэння.

17.76. Кандэнсатар ёмістасцю  $C_1 = 20$  мкФ зараджаны да напружання  $U = 200$  В. Да яго далучаюць паралельна незараджаны кандэнсатар ёмістасцю  $C_2 = 300$  мкФ. Якое напружанне ўстаноўіцца пасля іх злучэння?

17.77. Сістэму кандэнсатараў ёмістасцю  $C = 100$  мкФ, складзенную з трох паралельна злучаных аднолькавых кандэнсатараў, уключылі ў сетку напружаннем  $U = 250$  В. На абкладках аднаго з кандэнсатараў з'явіўся зарад  $Q_1 = 10$  мКл. Вызначыць ёмістасць і зарад кожнага з двух астатніх аднолькавых кандэнсатараў.

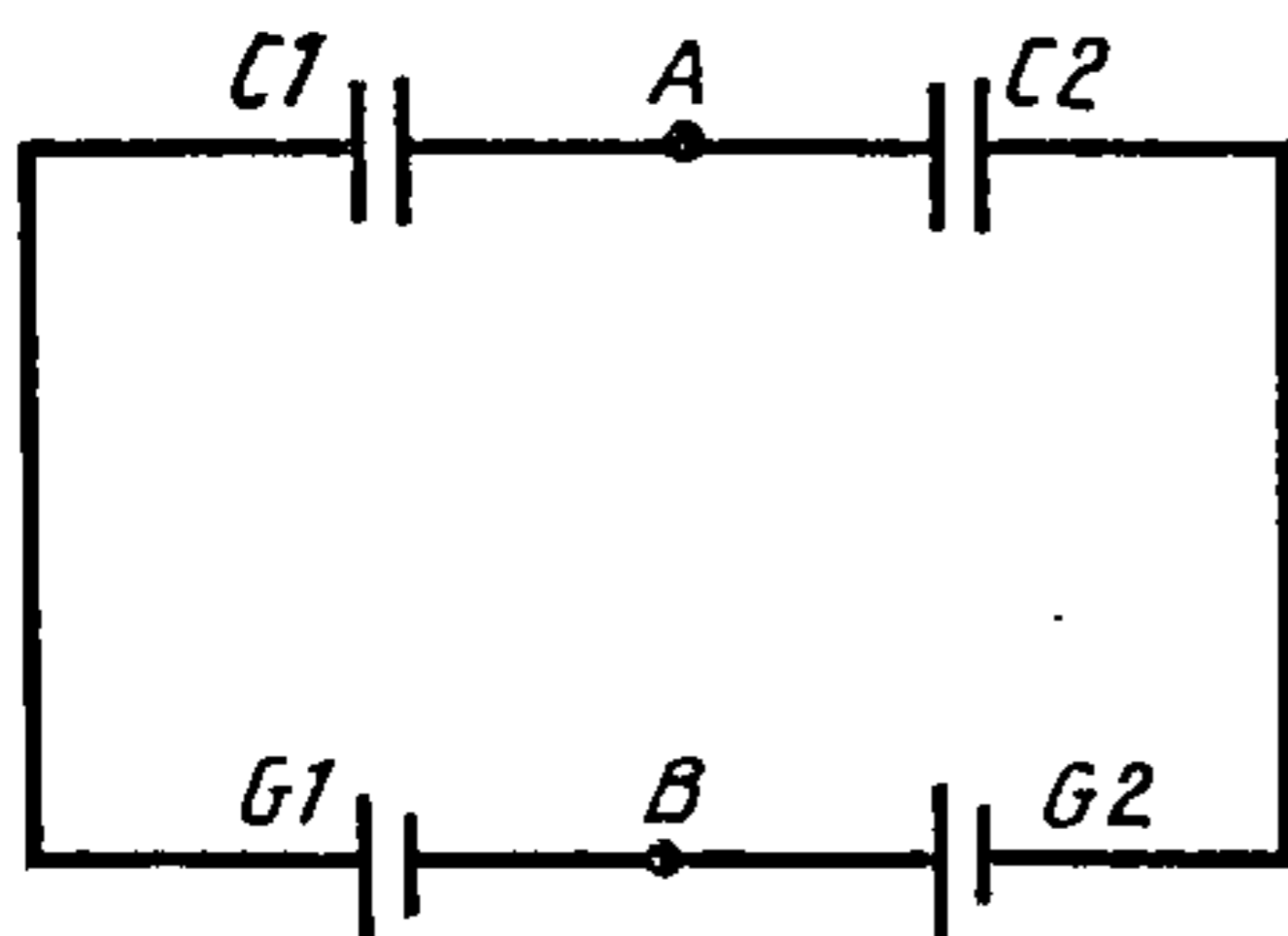
17.78. Максімальная ёмістасць кандэнсатара пераменнай ёмістасці  $C_{\max} = 350$  мкФ. Колькі пласцін паўкруглай формы радыусам  $R = 5$  см утрымлівае кандэнсатар, калі адлегласць паміж імі  $d = 1$  мм?

17.79. З кандэнсатараў ёмістасцю  $0,5$  мкФ кожны, разлічаных на рабочае напружанне  $1,0$  кВ, неабходна скласці батарэю кандэнсатараў ёмістасцю  $1,0$  мкФ, якую можна было б далучыць да крыніцы току напружаннем  $2,0$  кВ. Колькі патрэбна для гэтага кандэнсатараў і як іх злучыць? Даць схему злучэння.

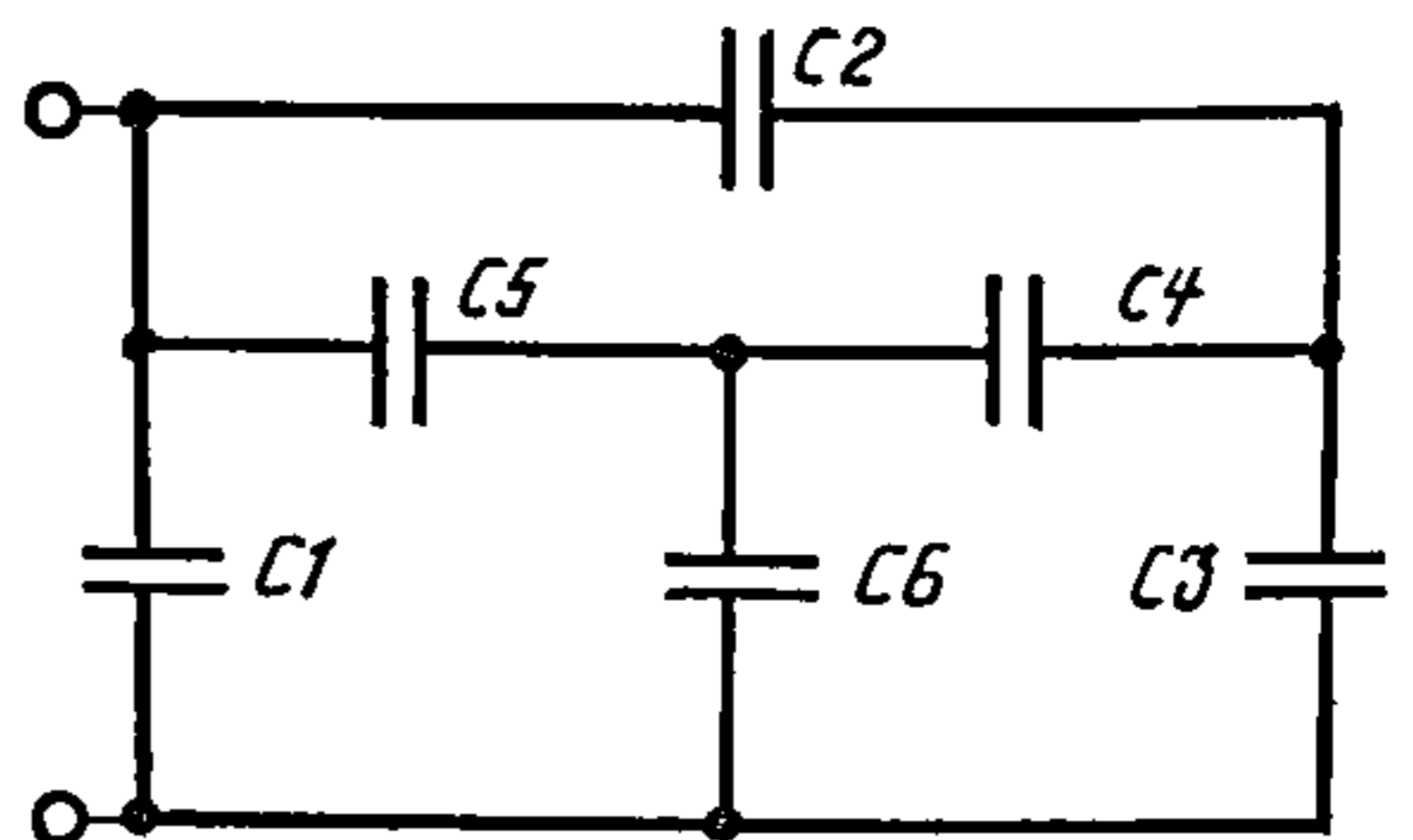
17.80. Знайсці рознасць патэнцыялаў паміж пунктамі  $A$  і  $B$  схемы, паказанай на рыс. 17.11. Ёмістасці кандэнсатараў  $C_1 = 0,5$  мкФ і  $C_2 = 1,0$  мкФ; ЭРС крыніц  $E_1 = 2$  В і  $E_2 = 3$  В.

17.81. Знайсці ёмістасць батарэі кандэнсатараў, паказанай на рыс. 17.12, калі ёмістасць кожнага кандэнсатара роўная  $C$ .

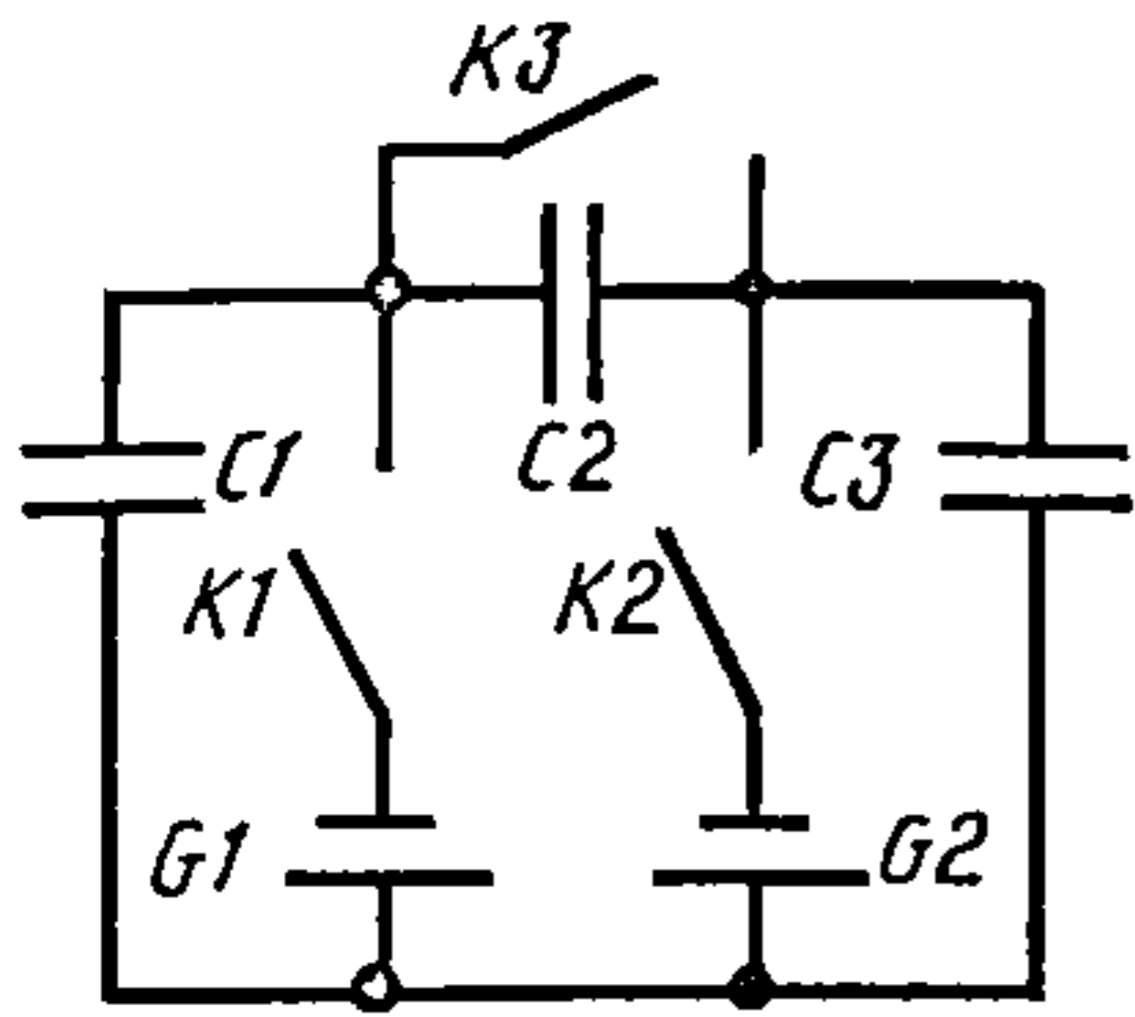
17.82. У схеме, паказанай на рыс. 17.13, першапачаткова ўсе ключы разамкнутыя і ўсе кандэнсатары не зараджаны. Потым замыкаюць ключы  $K_1$  і  $K_2$ , а ключ  $K_3$  застаецца разамкнутым. Праз некаторы час ключы  $K_1$  і  $K_2$  размыкаюць, а ключ  $K_3$  замыкаюць. Знайсці зарад на кандэнсатары



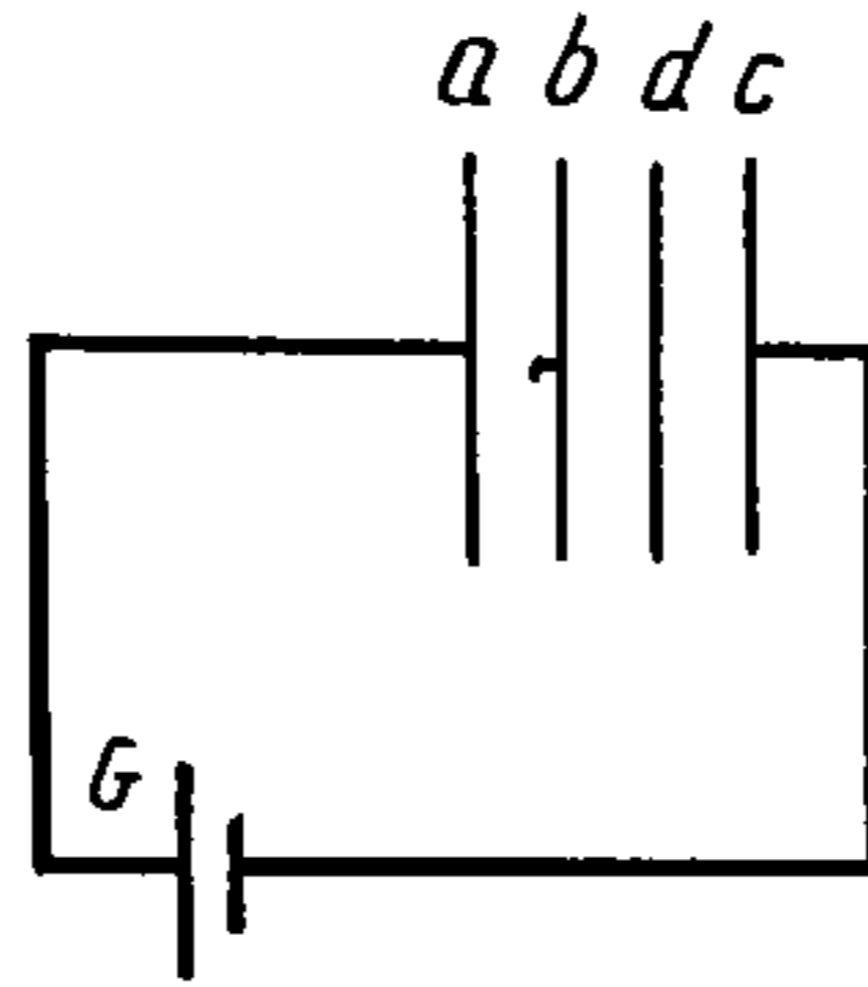
Рыс.17.11



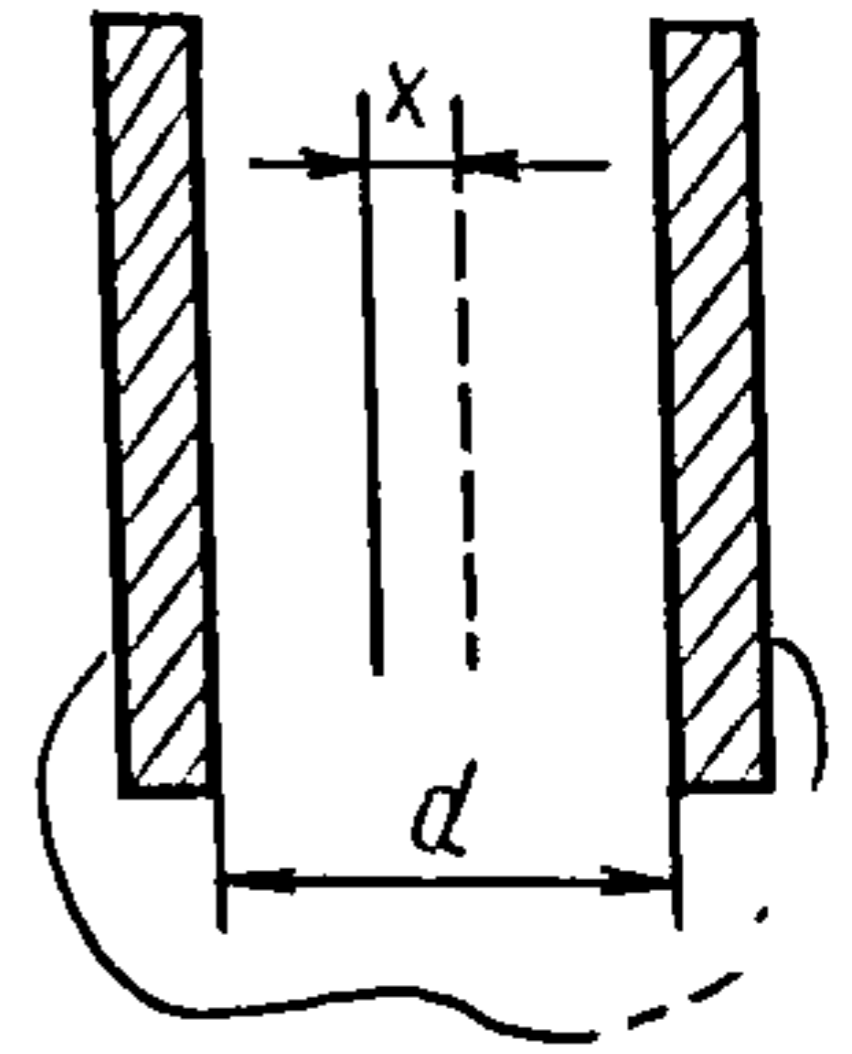
Рыс.17.12



Рыс.17.13



Рыс.17.14



Рыс.17.15

$C_1$  пасля ўказаных пераключэнняў. Ёмістасць кандэнсатараў  $C$  і ЭРС крыніц указаны на рысунку літарамі.

17.83. Чаму роўная ёмістасць сістэмы, калі паміж абкладкамі плоскага кандэнсатара ўносіцца ў адным выпадку пласціна з дыэлектрыка, а ў другім — пласціна з правадніка? Таўшчыня кожнай пласціны роўная палавіне адлегласці  $d$  паміж абкладкамі.

17.84. Напружанасць поля зараджанага плоскага кандэнсатара з адлегласцю паміж пласцінамі  $6,0$  см роўная  $150$  В/см. Паралельна пласцінам у кандэнсатар уносіцца незараджаная металічная пласціна таўшчынёй  $1,5$  см. Знайсці рознасць патэнцыялаў паміж пласцінамі кандэнсатара перад і пасля ўнясення металічнай пласціны.

17.85. У плоскі кандэнсатар (рыс. 17.14) памяшчаюць дзве металічныя пласціны на аднолькавых адлегласцях і кандэнсатар падключаюць да крыніцы току з ЭРС  $E$ . Знайсці: 1) патэнцыялы кожнай з пласцін; 2) прырашчэнне патэнцыялаў пласцін  $b$  і  $c$  і напружанасць палёў ва ўсіх прамежках, пасля таго як пласціны  $b$  і  $c$  на кароткі час будуць злучаны правадніком, а таксама вызначыць, ці будуць зарады на пласцінах  $b$  і  $c$  перад і пасля замыкання і што будзе пры гэтым з зарадамі пласцін  $a$  і  $d$ .

17.86. У плоскі кандэнсатар з плошчай пласцін  $S$  і адлегласцю паміж імі  $d$  уводзіцца дыэлектрычная пласціна таўшчынёй  $h$  ( $h < d$ ) дыэлектрычнай пранікальнасцю  $\epsilon$ . З дапамогай крыніцы току паміж пласцінамі кандэнсатара падтрымліваецца пастаянная рознасць патэнцыялаў  $U$ . Знайсці ёмістасць кандэнсатара ў залежнасці ад таўшчыні  $h$  пласціны і напружанасць  $E$  электрычнага поля ў паветраным і дыэлектрычным сляях, а таксама напружанасць у абодвух сляях, калі кандэнсатар спачатку адключаецца ад крыніцы току і толькі пасля гэтага ў кандэнсатар уводзіцца дыэлектрычная пласціна.

17.87. Паміж пласцінамі накоратка замкнутага плоскага кандэнсатара змясцілі металічную пласціну з раўнамерна размеркаваным зарадам  $Q$ . Пласціну павольна перамяшчаюць паралельна самой сабе на адлегласць  $x$  (рыс. 17.15). Які зарад праходзіць пры гэтым па знешнім ланцугу кандэнсатара, калі адлегласць паміж пласцінамі роўная  $d$ ?

17.88. Паміж пласцінамі накоратка замкнутага кандэнсатара (плоскага)



знаходзіцца пунктавы зарад  $Q$ . Плошча пласцін бясконца вялікая, адлегласць паміж імі роўная  $d$ . Першапачаткова зарад знаходзіцца на адлегласці  $d/3$  ад левай пласціны. Які зарад пройдзе па правадніку, што замыкае пласціны кандэнсатара, пры перамяшчэнні зарада  $Q$  у новае становішча на адлегласць  $d/3$  ад правай пласціны?

17.89. Плоскі кандэнсатар з адлегласцю паміж пласцінамі  $d = 1$  мм зараджаны да напружання  $U = 2$  кВ. Знайсці сілу ўзаемадзеяння паміж пласцінамі кандэнсатара плошчай  $S = 50$  см<sup>2</sup>.

### Энергія электрычнага поля

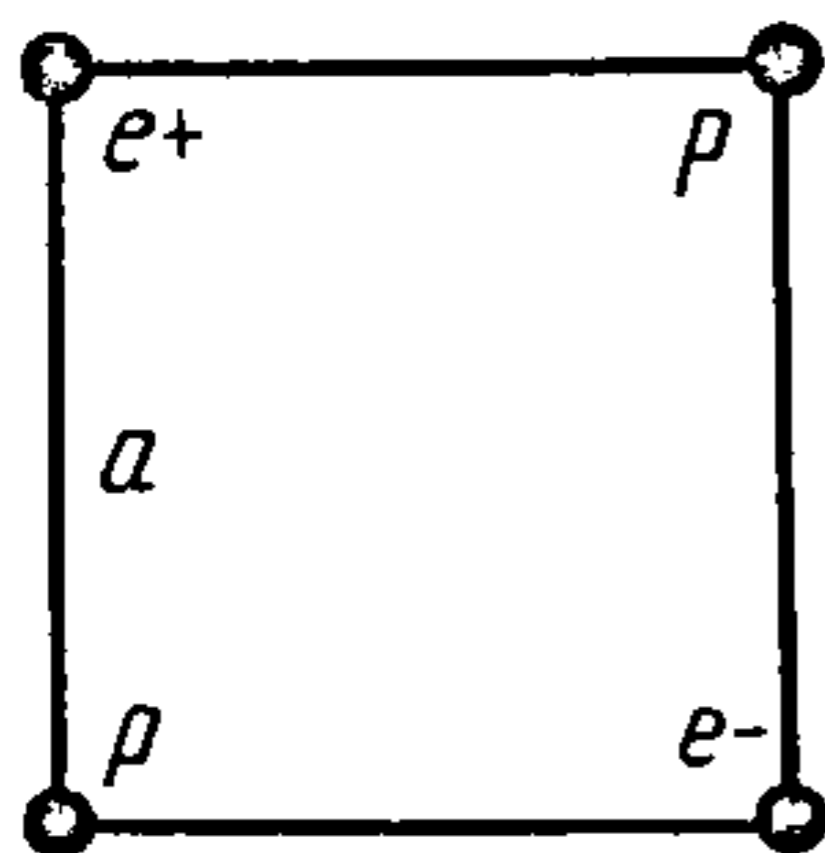
17.90. Два пратоны і два пазітроны, якія першапачаткова знаходзіліся ў стане пакою ў вяршынях квадрата са стараной  $a$  (рыс. 17.16), разляцеліся. Адносіна іх мас  $m_1 / m_2 = 200$ , а зарады аднолькавыя. Знайсці адносіну скорасцей пратонаў і пазітронаў пасля разлёту (на бесконцасць).

17.91. На рыс. 17.17 показана капельная электростатычная машына (генератар Кельвіна). З трубкі ў полі ізаляваны металічны шар радыусам  $R$  падаюць кроплі вады, зараджаныя да патэнцыяла  $\varphi_0$ . Як залежыць гранічны патэнцыял, да якога можа зарадзіцца шар, ад вышыні падання кропель, калі радыус кроплі  $r$ ?

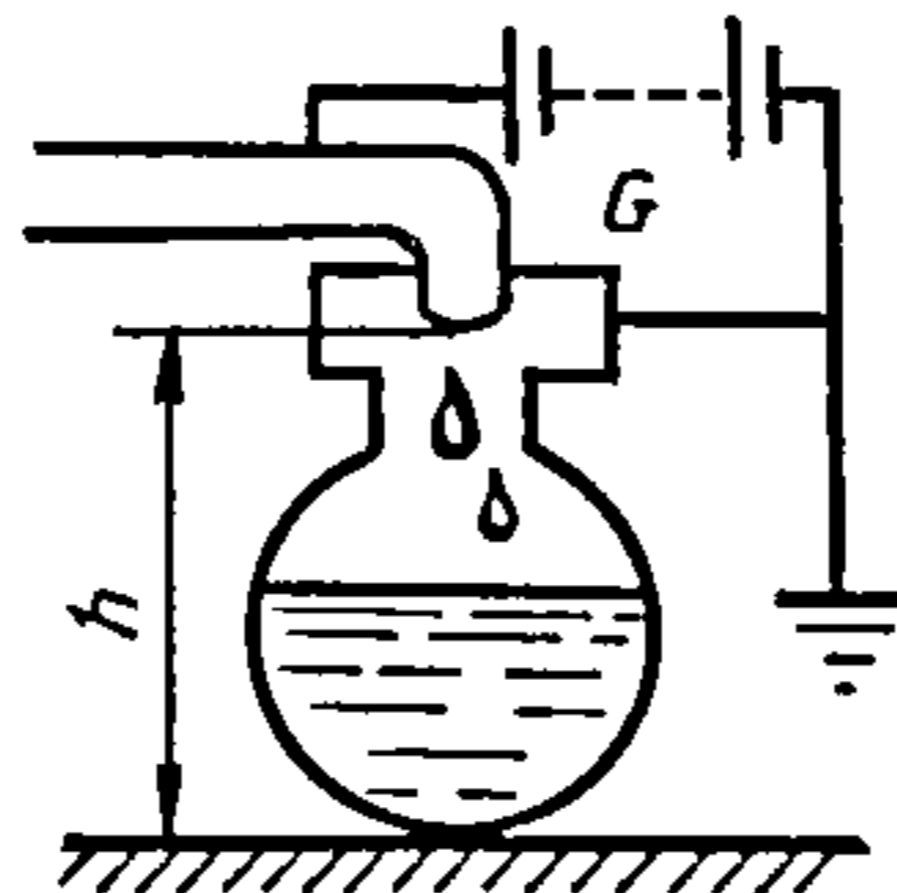
17.92. На металічны ізаляваны шарык радыусам  $R$  накіравалі пучок зараджаных часцінак, якія маюць масы  $m$  і зарады  $Q$ . Скорасці часцінак, што знаходзяцца вельмі далёка ад шарыка, роўныя  $v_0$  і накіраваны да яго цэнтра. Колькі часцінак зможа дасягнуць паверхні шарыка, калі пры пападанні на шарык часцінка «прыліпае» да яго?

17.93. Два аднолькавыя пунктавыя зарады  $Q$ , якія знаходзяцца на канцах аднаго дыяметра (рыс. 17.18), рухаюцца па акружнасці радыусам  $R$  вакол зарада  $Q_1$ . Знайсці вуглавую скорасць руху зарадаў  $Q$  і адносіну агульнай кінетычнай энергіі зарадаў да патэнцыяльнай.

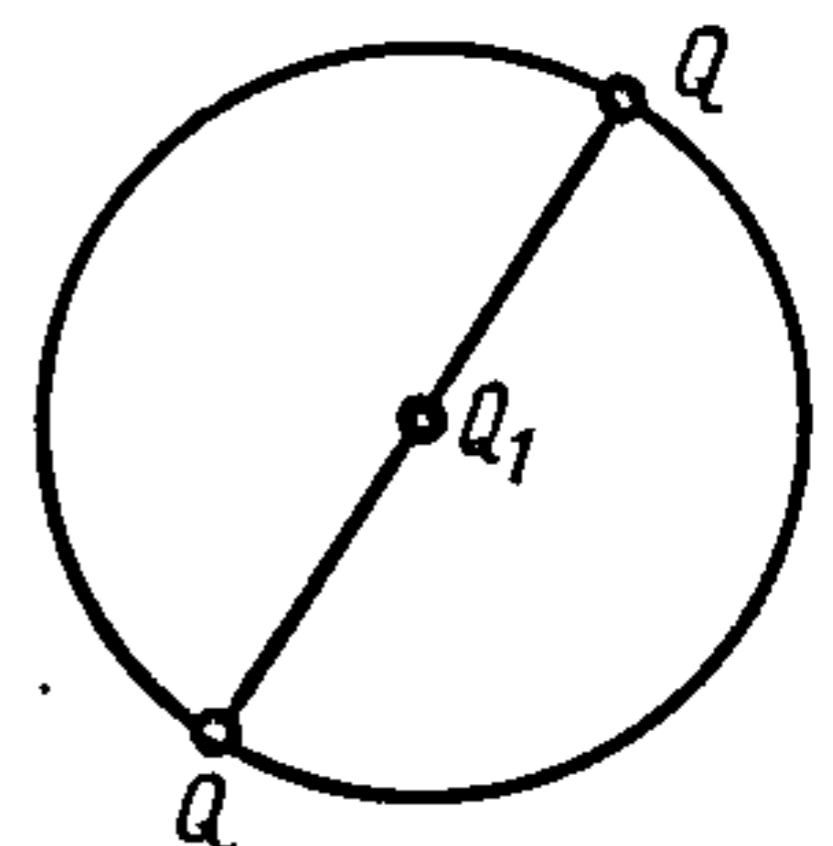
17.94. У аднароднае электрычнае поле напружанасцю  $E$  памешчаны ўздоўж адной і той жа сілавой лініі нерухомы зарад  $+Q_1$  і на адлегласці  $l$  ад яго зараджаны шарык масай  $m$  і зарадам  $+Q_2$  (рыс. 17.19). Шарык адпускаюць. Якую максімальную скорасць ён атрымае, калі будзе рухацца ўздоўж



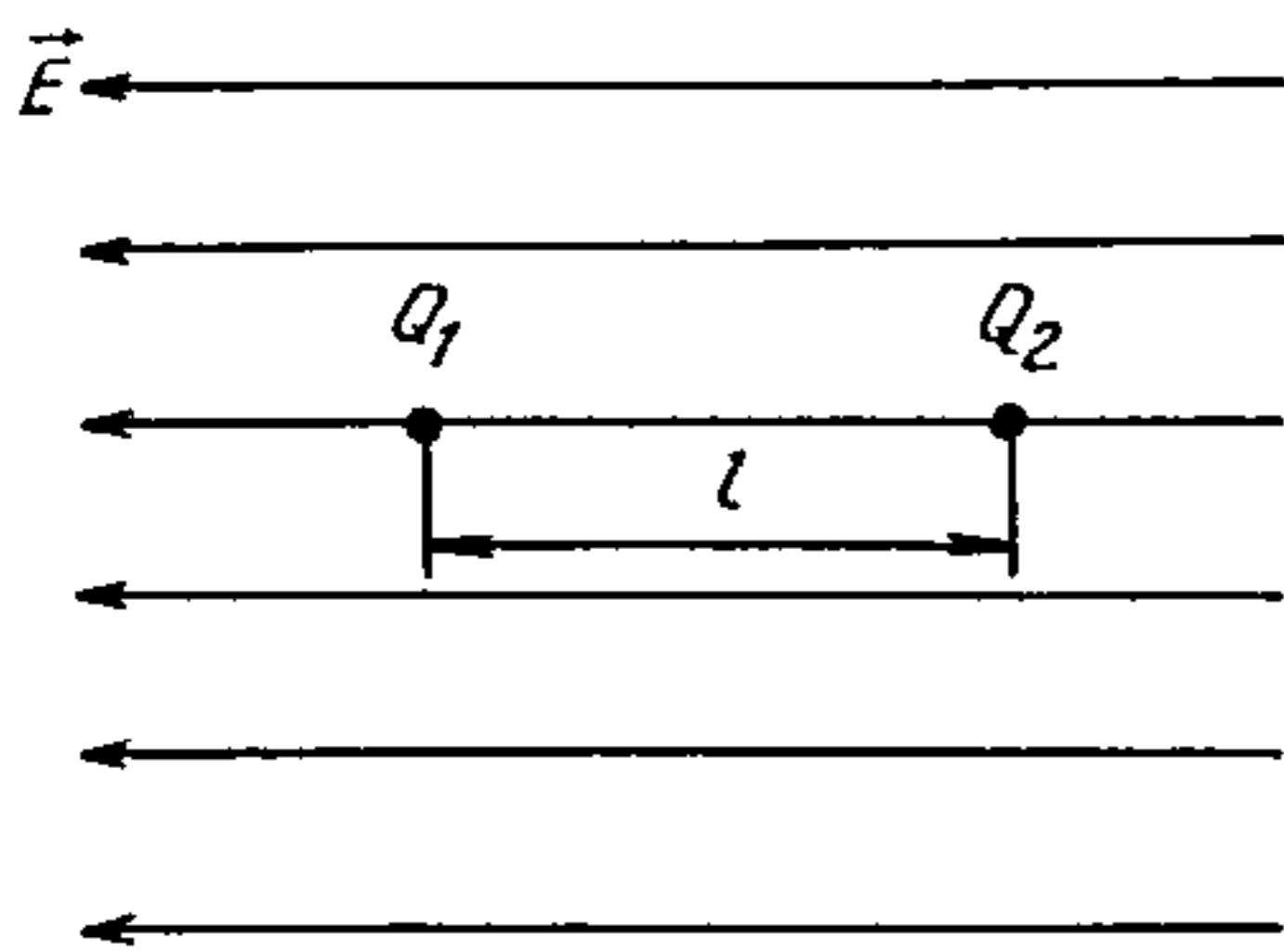
Рыс.17.16



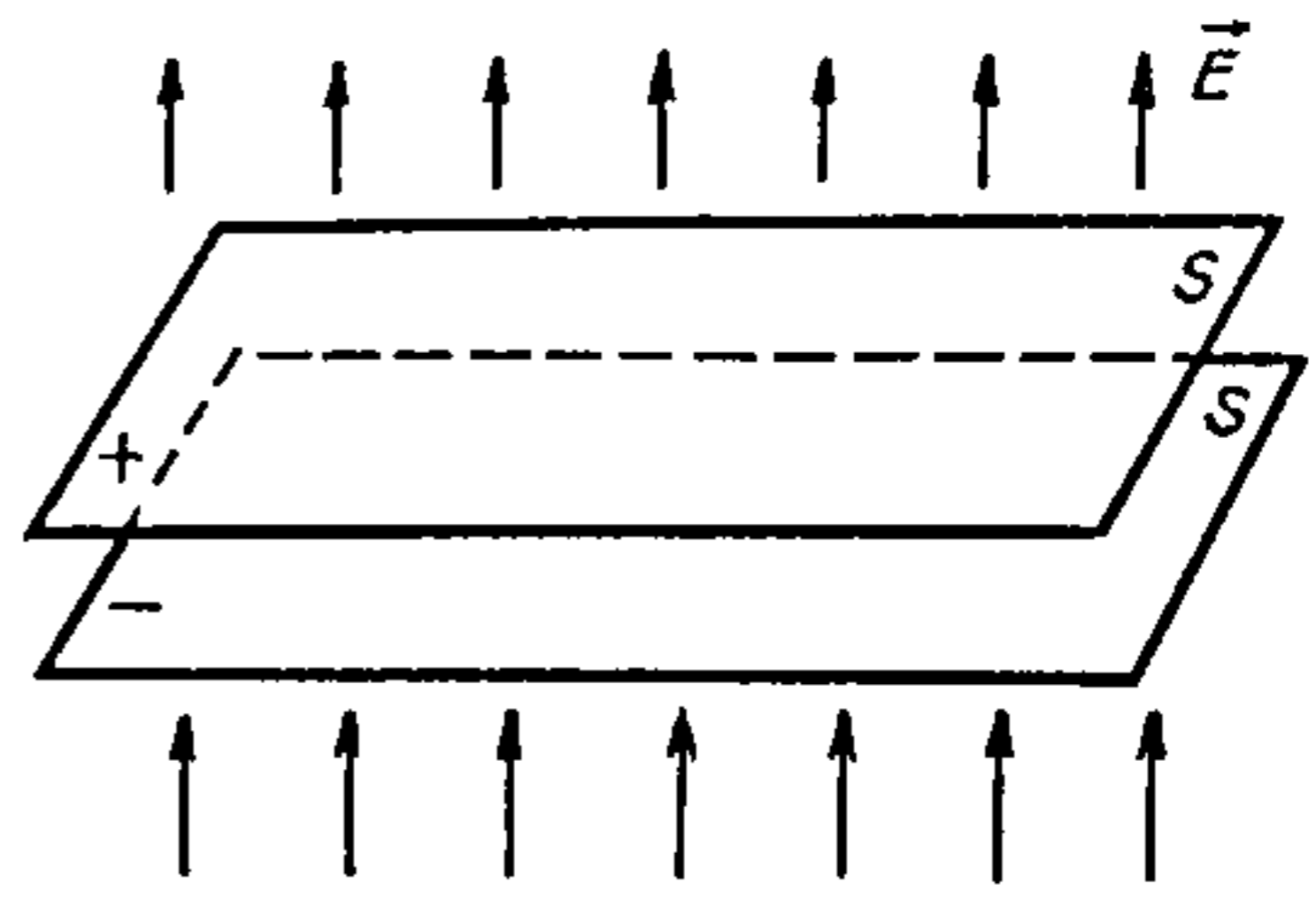
Рыс.17.17



Рыс.17.18



Рыс.17.19



Рыс.17.20

сілавой лініі?

17.95. Пласціны ізаляванага кандэнсатара павольна рассоўваюць так, што ёмістасць яго мяняецца ад  $C_1$  да  $C_2$  ( $C_1 > C_2$ ), прычым поле паміж пласцінамі ўвесь час застаецца аднародным. Якую работу супраць электрычных сіл зробіць знешнія сілы, калі зарад кандэнсатара  $Q$ ?

17.96. Плоскі паветраны кандэнсатар з адлегласцю паміж пласцінамі  $d = 5$  см і плошчай пласцін  $S = 500$  см<sup>2</sup> падключаны да крыніцы току з ЭРС  $E = 2$  кВ. Паралельна пласцінам у кандэнсатар уведзіцца металічная пласціна таўшчынёй  $h = 1$  см. Якую работу выконвае крыніца току?

17.97. Знайсці механічную работу, зробленую электрычнымі сіламі пры павароце ручкі настройкі кандэнсатара пераменнай ёмістасці, падключанага да крыніцы току з ЭРС  $E = 300$  В, калі ёмістасць яго мяняецца ад  $C_1 = 10$  мкФ да  $C_2 = 100$  мкФ.

17.98. Плоскі паветраны кандэнсатар ёмістасцю  $C_1 = 1$  мкФ зарадзілі да рознасці патэнцыялаў  $U_1 = 300$  В і адключылі ад крыніцы напружання. Якую работу супраць электрычных сіл неабходна выканаць, каб павялічыць адлегласць паміж пласцінамі кандэнсатара ў 5 разоў? Якая будзе пасля гэтага рознасць патэнцыялаў  $U_2$  паміж пласцінамі?

17.99. Плоскі паветраны кандэнсатар знаходзіцца ў знешнім аднародным электрычным полі напружанасцю  $E$  і размешчаны перпендыкулярна сілавым лініям поля (рыс. 17.20). Плошча кожнай з пласцін  $S$ , на пласцінах раўнамерна размеркаваны зарады  $+Q$  і  $-Q$ , адлегласць паміж пласцінамі  $d$ . Якую работу супраць электрычных сіл трэба выканаць, каб павярнуць кандэнсатар на  $180^\circ$  вакол восі, перпендыкулярнай к вектару  $E$ ?

17.100. На сферычнай абалонцы радыусам  $R$  раўнамерна размеркаваны зарад  $Q$ . Выкарыстоўваючы закон захавання энергіі, знайсці электрычную сілу, якая прыходзіцца на адзінку плошчы абалонкі.

17.101. Дзве канцэнтрычныя сферычныя паверхні, якія знаходзяцца ў вакууме, маюць раўнамерна размеркаваныя аднолькавыя зарады  $Q = 3$  мкКл. Радыусы гэтых паверхняў  $R_1 = 1$  м і  $R_2 = 2$  м. Знайсці энергію электрычнага поля, заключанага паміж гэтымі сферамі.

17.102. Як мяняецца ёмістасць  $C$ , рознасць патэнцыялаў  $\varphi_1 - \varphi_2 = U$



паміж пласцінамі і энергія поля кандэнсатара  $W$  пры павелічэнні (памяншэнні) адлегласці  $d$  паміж пласцінамі кандэнсатара, калі: 1) кандэнсатар зарадзілі і адключылі ад крыніцы пастаяннага напружання; 2) кандэнсатар падключаны да крыніцы пастаяннага напружання? Растворыце прычыну змянення  $C$ ,  $U$  і  $W$ .

17.103. Два кандэнсатары ёмістасцю  $C_1$  і  $C_2$  зараджаны да рознасцей патэнцыялаў  $\Delta\varphi_1$  і  $\Delta\varphi_2$  ( $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2$ ). Дакажаць, што пры паралельным злучэнні гэтых кандэнсатараў іх агульная электрычная энергія памяншаецца. Растворыце, чаму адбываецца памяншэнне энергіі.

17.104. Два кандэнсатары ёмістасцю  $C_1 = 2$  мкФ і  $C_2 = 3$  мкФ злучылі паслядоўна і зарадзілі да рознасці патэнцыялаў  $U = 1$  кВ. Як зменіцца энергія сістэмы, калі яе адключыць ад крыніцы напружання і аднайменна зараджаныя абкладкі кандэнсатараў злучыць паралельна?

17.105. У прастору паміж пласцінамі плоскага паветранага кандэнсатара ўведзена кропля масла, якая мае зарад  $Q = 3,2$  аКл. Вызначыць сілу, што дзейнічае з боку электрычнага поля на гэтую кроплю, і энергію ў адзінцы аб'ёму гэтага поля, калі адлегласць паміж пласцінамі  $d = 5,0$  мм і да іх прыкладзена рознасць патэнцыялаў  $U = 360$  В, якая падтрымліваецца крыніцай ЭРС.

17.106. Пасля зарадкі да рознасці патэнцыялаў  $U = 1,5$  кВ плоскі паветраны кандэнсатар з адлегласцю паміж пласцінамі  $d = 2,0$  см і плошчай пласцін  $S = 20,0$  м<sup>2</sup> кожная адключаюць ад крыніцы току і павялічваюць адлегласць паміж пласцінамі ўдвая. Вызначыць работу па рассоўванні пласцін, што выконваецца супраць сіл поля, і шчыльнасць энергіі электрычнага поля кандэнсатара перад і пасля рассоўвання пласцін.

17.107. Плоскі кандэнсатар з плошчай пласцін  $20$  см<sup>2</sup> кожная і адлегласцю паміж імі  $3$  мм запоўнены дыэлектрыкам дыэлектрычнай пранікальнасцю  $\epsilon = 3$ . Знайсці: ёмістасць кандэнсатара; зарад, які неабходна надаць, каб зарадзіць кандэнсатар да напружання  $300$  В; змяненне напружання кандэнсатара, калі ў зараджаным стане (ён выключаны) з яго выняць дыэлектрык; энергію поля кандэнсатара пры наяўнасці дыэлектрыка і без яго.

## § 18. ПАСТАЯННЫ ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК

Сіла току

$$I = dQ/dt.$$

Закон Ома для неаднароднага ўчастка ланцуга

$$I = U_{1,2}/R_{1,2},$$

дзе  $U_{1,2}$  — напружанне на дадзеным участку ланцуга;  $R_{1,2}$  — сума ўсіх супраціўленняў участка.

Правіла Кірхгофа для разгалінаваных ланцугоў:

1) алгебраічная сума сіл токаў, якія знаходзяцца ў вузлавых пунктах, раўняецца нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \text{ Токі, якія прыцякаюць да вузлавых пунктаў, лічацца дадатнымі, а якія выцякаюць — адмоўнымі ці наадварот;}$$

2) для любога замкнёнага контура, які адвольна выбраны ў складаным ланцугу, алгебраічная сума здабыткаў сіл токаў  $I_k$  на супраціўленне  $R_k$  адпаведных участкаў ланцуга роўная алгебраічнай суме ўсіх ЭРС, якія дзейнічаюць у гэтым контуры:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{i=1}^n E_i.$$

Для рашэння задач выбіраецца адвольна вызначаны напрамак абходу контура (напрыклад, па стрэлцы гадзінніка ці супраць яе). Ва ўсіх участках ланцуга адвольна выбіраюцца напрамкі токаў. Токі, якія супадаюць з выбраным напрамкам абходу, лічацца дадатнымі, процілеглыя гэтаму напрамку — адмоўнымі. ЭРС крыніц току лічыцца дадатнай, калі яна павялічвае патэнцыял у напрамку абходу контура.

Магутнасць, якую развівае ток на разглядаемым участку ланцуга:

$$P = U_{1,2} I.$$

Закон Джоўля— Ленца

$$Q = I^2 R t.$$

## Закон Ома

18.1. Сіла току ў медным провадзе сячэннем  $S = 1 \text{ мм}^2$  складае  $I = 10 \text{ мА}$ . Знайсці сярэдняю скорасць  $\langle v \rangle$  упарадкаванага руху электронаў уздоўж правадніка, калі лічыць, што на кожны атам медзі прыпадае адзін электрон праводнасці. Атамная маса медзі  $A = 63,6$ , шчыльнасць  $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$ .

18.2. На працягу 20 с сіла току раўнамерна павялічвалася ад 0 да 5 А. Які зарад быў перанесены?

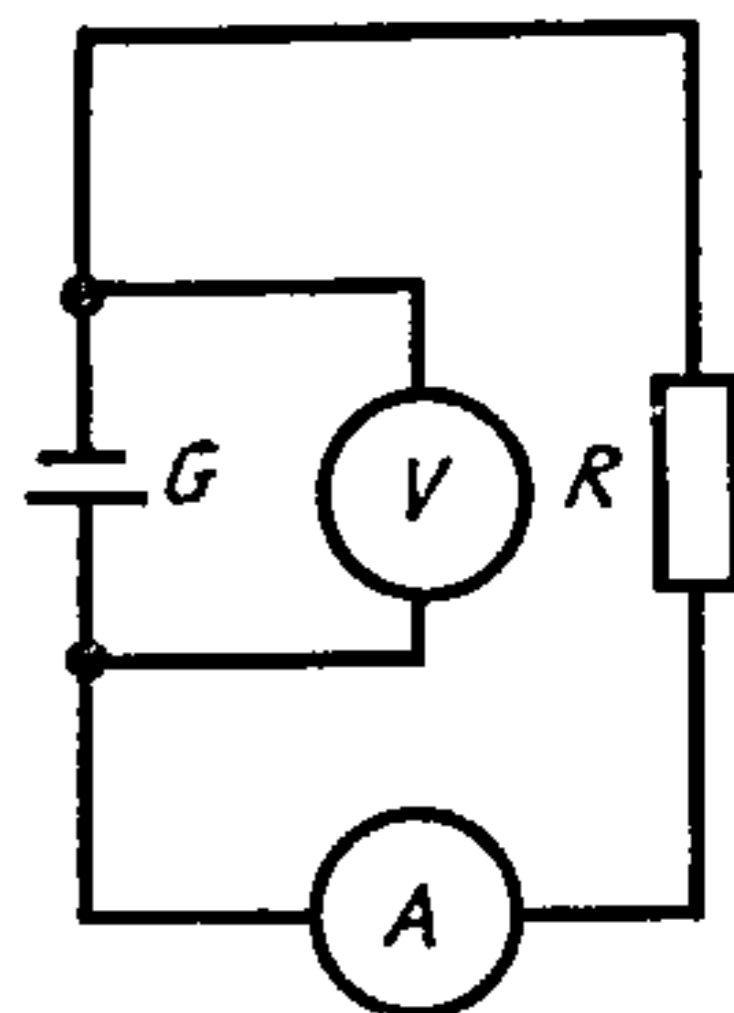
18.3. У правадніку плошчай папярочнага сячэння  $S = 5 \text{ см}^2$  і колькасцю свабодных электронаў  $n_0 = 10^{23} \text{ см}^{-3}$  сіла току  $I = 10 \text{ А}$ . Вызначыць напрамаковую скорасць электронаў  $v$ , калі лічыць яе аднолькавай для ўсіх электронаў.

18.4. Электрычны ланцуг (рыс. 18.1) складаецца з крыніцы току з унутраным супраціўленнем 0,2 Ом і знешняга супраціўлення 12,0 Ом. Знайсці сілу току ў знешнім ланцугу, ЭРС крыніцы, калі вальтметр паказвае 120 В; супраціўленне, якое неабходна падключыць у знешні ланцуг, каб атрымаць ад гэтай крыніцы сілу току 1 А, а таксама сілу току ў ланцугу і паказанні вальтметра пры кароткім замыканні крыніцы. Супраціўленне вальтметра не ўлічваць.

18.5. Батарэя з дзвюх паралельна злучаных крыніц з ЭРС 2,0 і 1,6 В і ўнутраным супраціўленнем 50,0 мОм кожная замкнута правадніком супраціўленнем 2,0 Ом. Знайсці сілу току ў правадніку і ў кожнай крыніцы. Разгледзець для выпадку паслядоўнага злучэння.

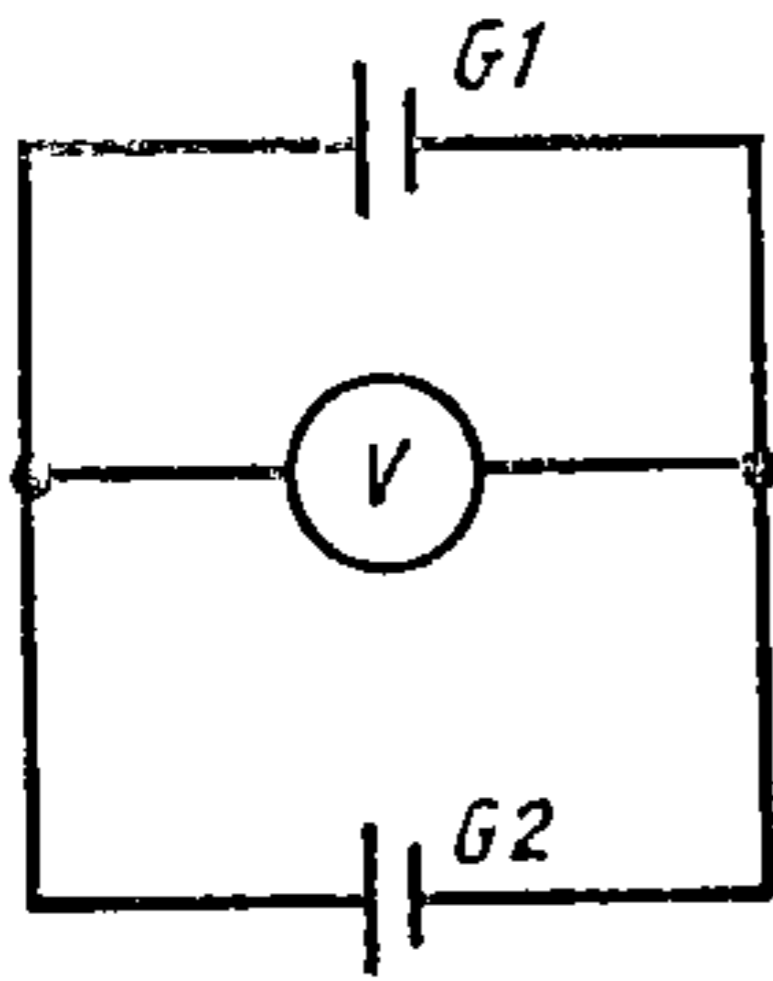
18.6. Якое паказанне вальтметра (рыс. 18.2), калі  $E_1 = 1,8 \text{ В}$ ,  $E_2 = 2,1 \text{ В}$ ,  $r_1 = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 0,2 \text{ Ом}$ ? Сілу току ў вальтметры і супраціўленне падводзячых правадоў не ўлічваць.

18.7. З меднага проваду даўжынёй  $l = 120 \text{ м}$  і плошчай

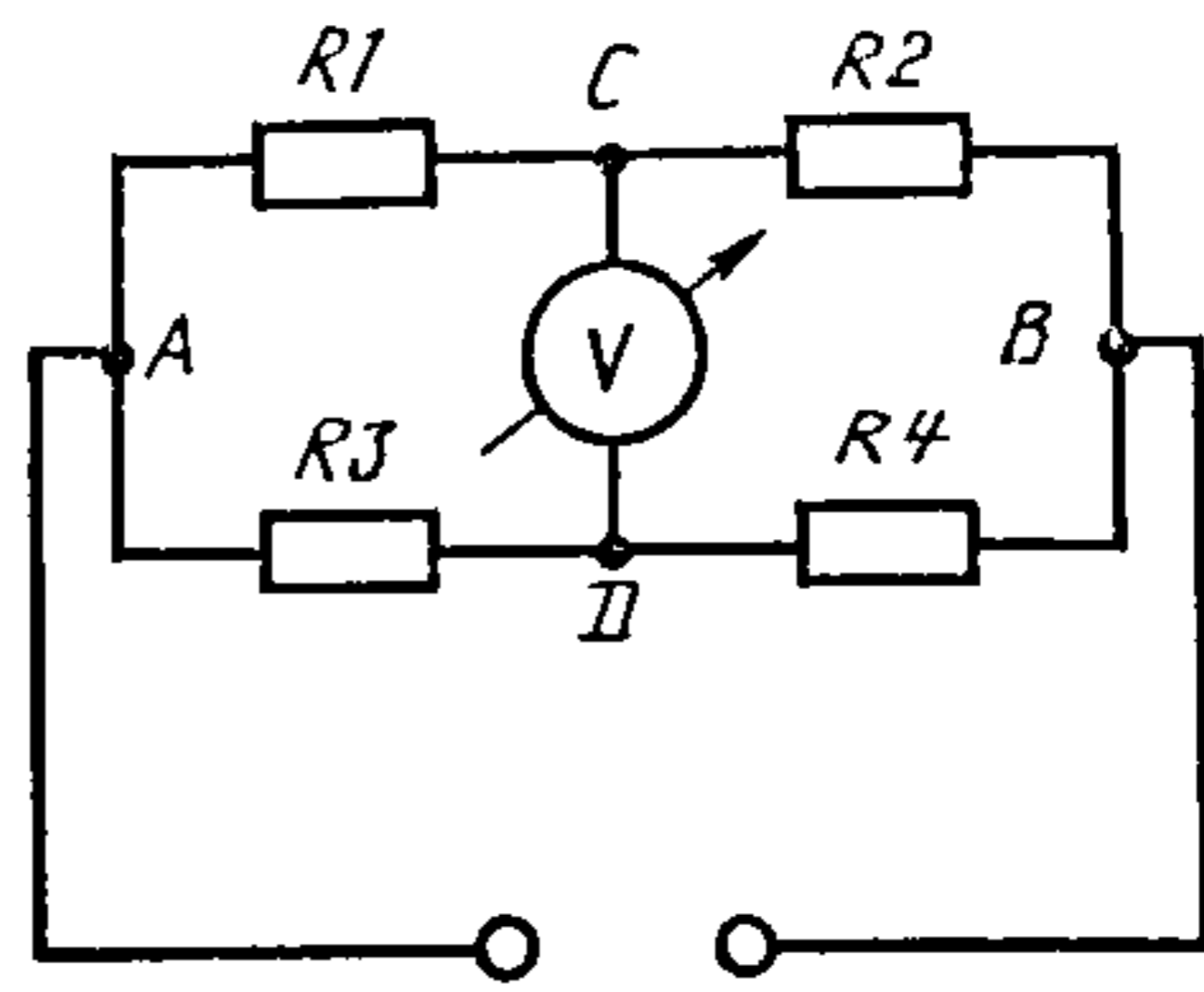
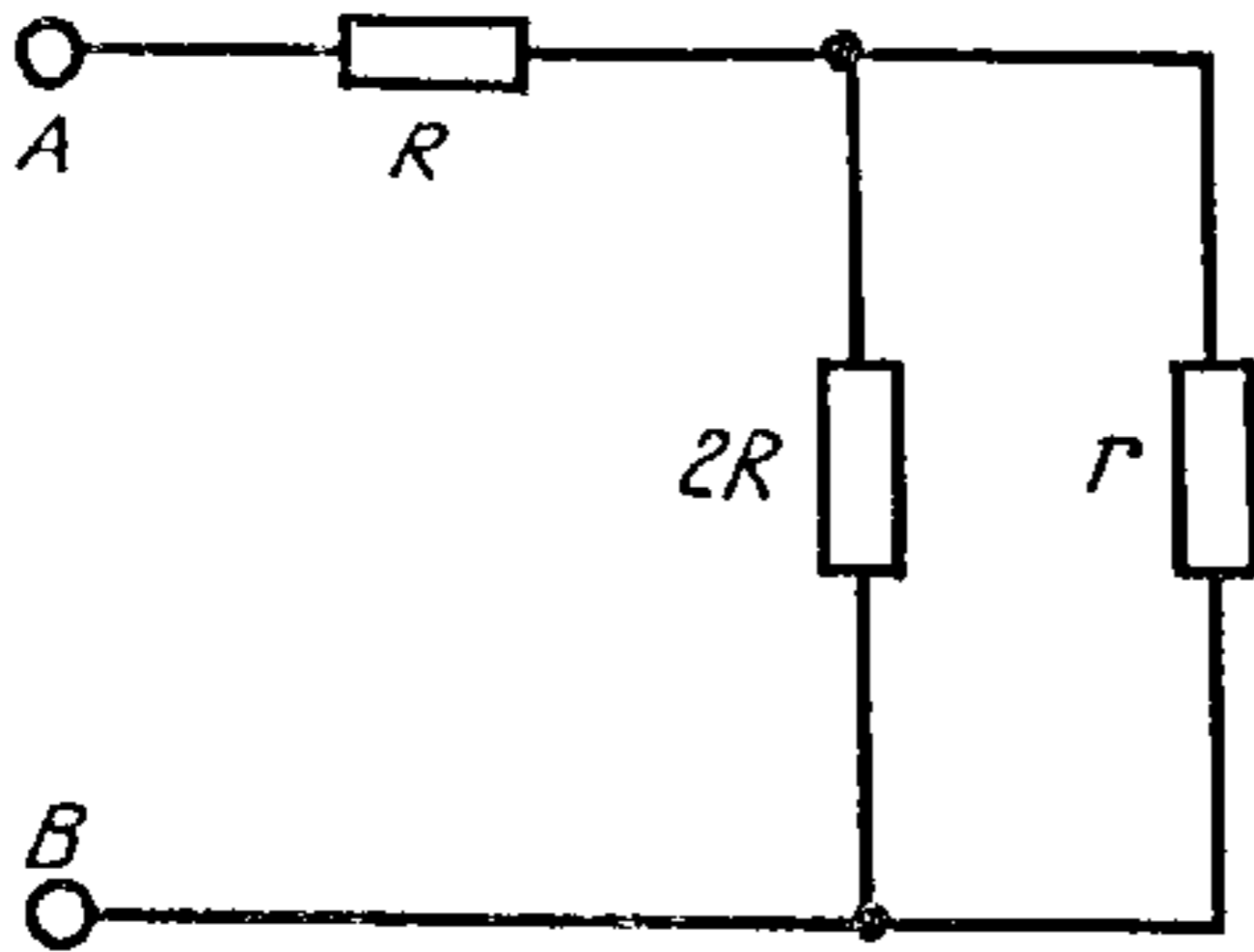


Рыс.18.1





а РИС.18.2



б РИС.18.3

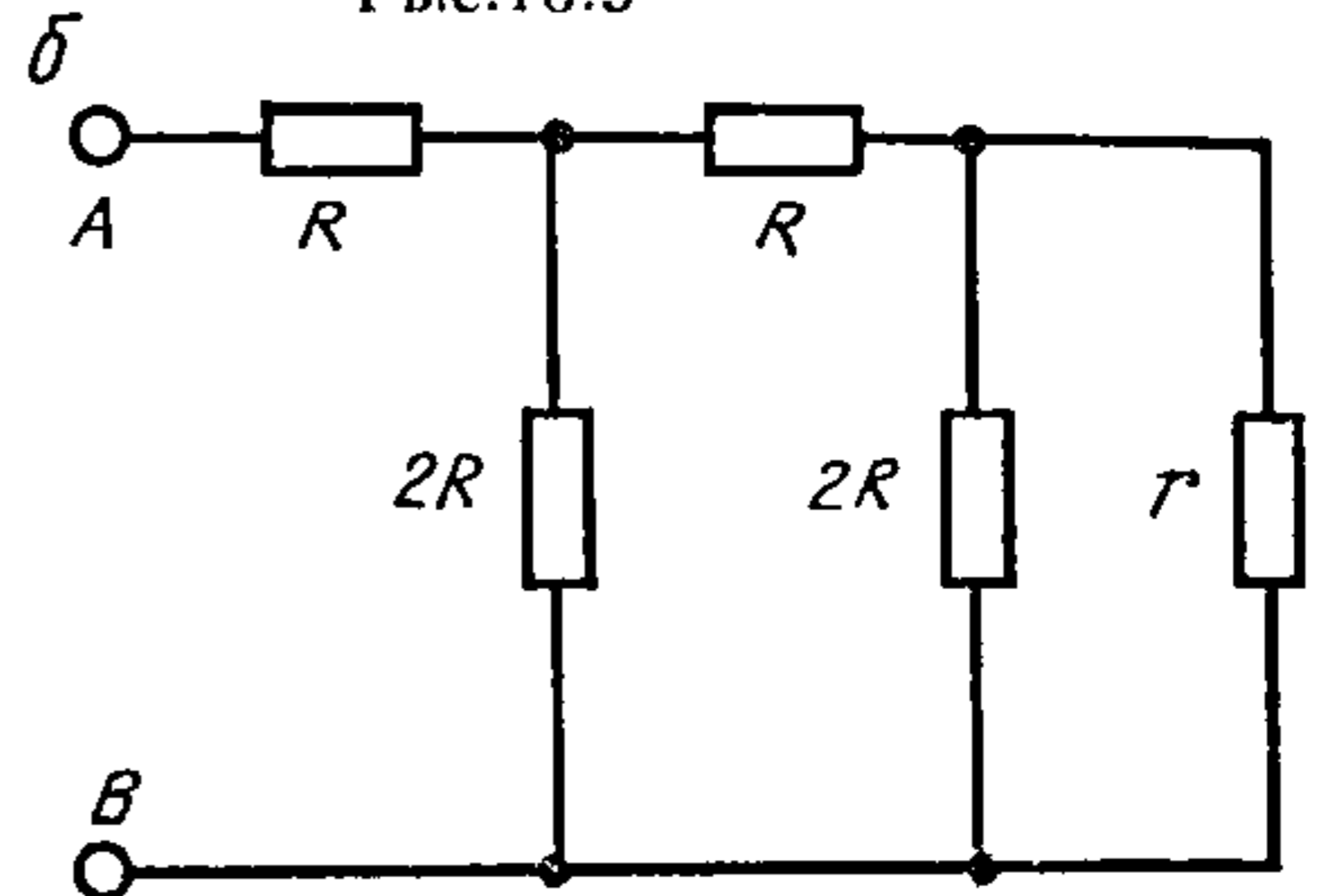


РИС.18.4

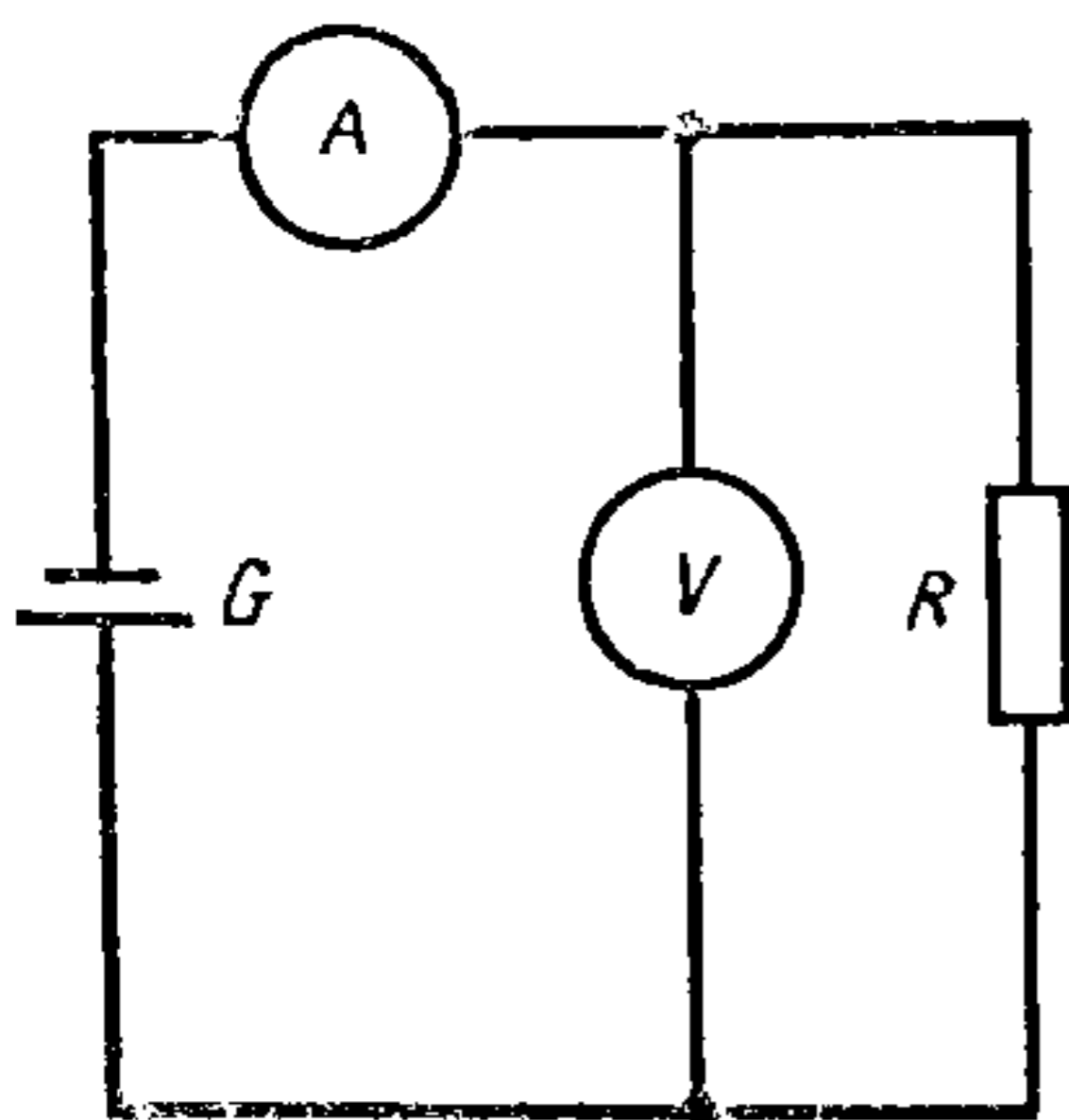


РИС.18.5

папярочнага сячэння  $S = 24 \text{ мм}^2$  намотана шпулька. Знайсці прырашчэнне супраціўлення шпулькі пры награванні яе ад  $t_1 = 20^\circ \text{ С}$  да  $t_2 = 70^\circ \text{ С}$ .

18.8. Знайсці тэмпературу вальфрамавай ніці лампы напальвання ў рабочым стане, калі вядома, што супраціўленне ніці ў момант уключэння лампы пры тэмпературы  $20^\circ \text{ С}$  ў 12,6 раз меншае, чым у рабочым стане.

18.9. Да контуру, які складаецца з рэзістараў  $R_1$  і  $R_2$ ,  $R_3$  і  $R_4$  (рыс. 18.3), у пунктах  $A$  і  $B$  падключана крыніца пастаяннага напружання  $U$ ,

а ў пунктах  $C$  і  $D$  — вальтметр з вялікім супраціўленнем. Якую рознасць патэнцыялаў пакажа вальтметр?

18.10. На рыс. 18.4 прадстаўлены два электрычныя ланцугі, якія складаюцца з рэзістараў з вядомымі супраціўленнямі  $R$  і  $2R$  і з рэзістараў невядомага супраціўлення  $r$ . Пры якім значэнні  $r$  супраціўленні абодвух ланцугоў, вымераныя паміж пунктамі  $A$  і  $B$ , акажуцца аднолькавымі і якое пры гэтым будзе супраціўленне ланцугоў?

18.11. Да батарэі з ЭРС  $\mathcal{E} = 9 \text{ В}$  і невядомым унутраным супраціўленнем падключаны паслядоўна амперметр і вальтметр (рыс. 18.5). Супраціўленні прыбораў невядомыя. Калі паралельна вальтметру падключыць прываднік невядомага супраціўлення, то паказанне амперметра павялічыцца ў два разы, а вальтметра — паменшыцца ў два разы. Якім стане паказанне вальт-





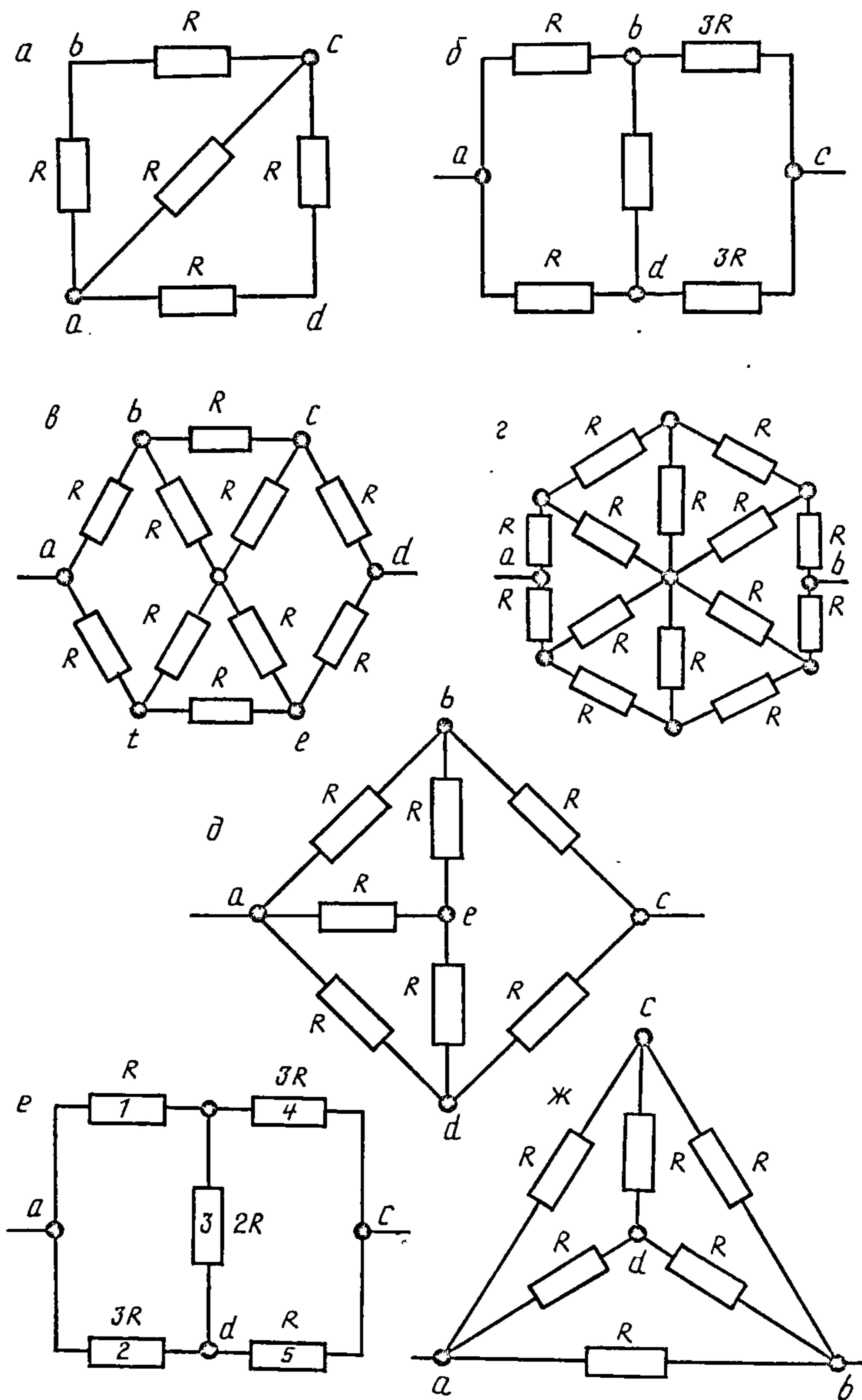


Рис. 18.8

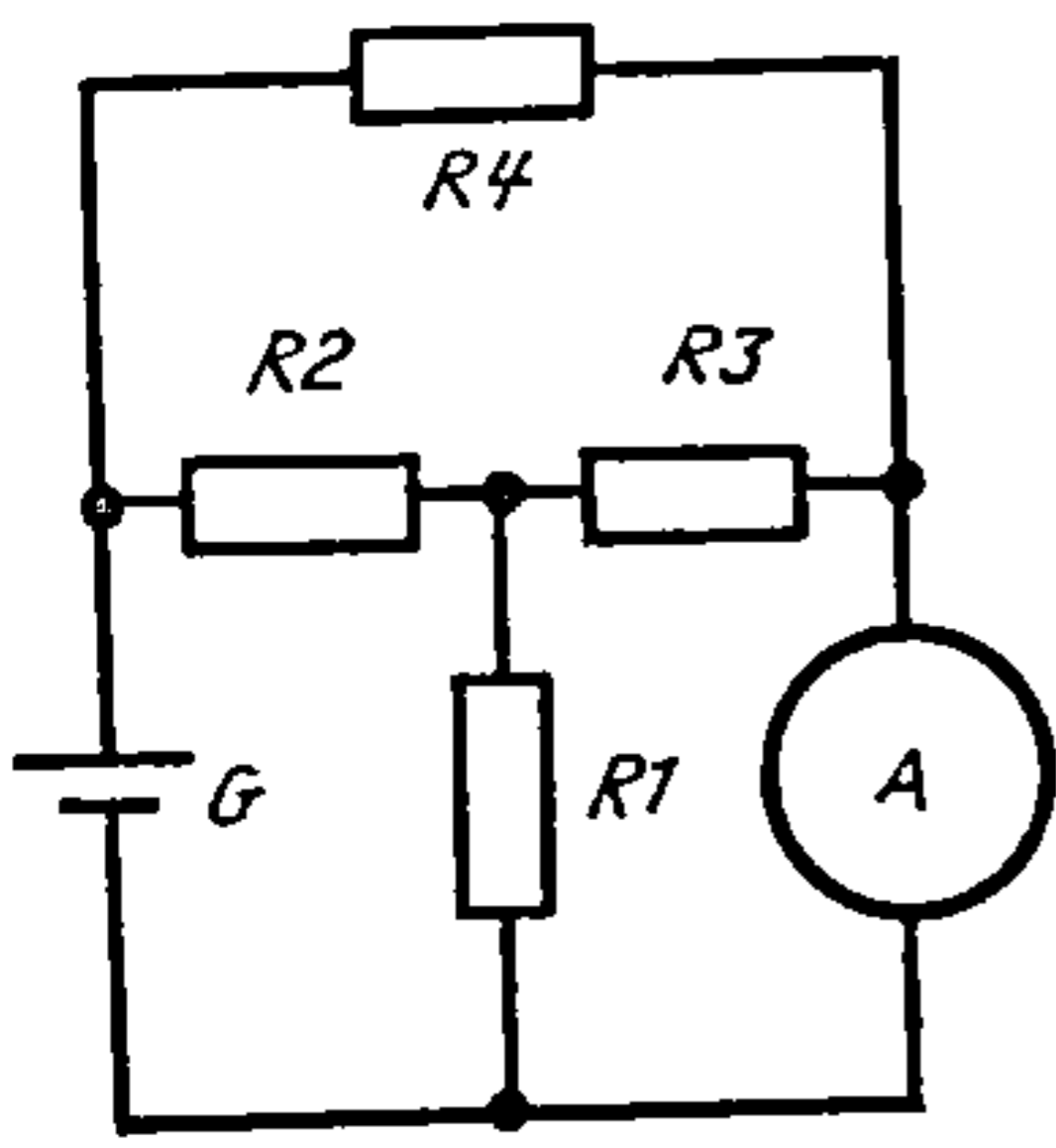


Рис.18.9

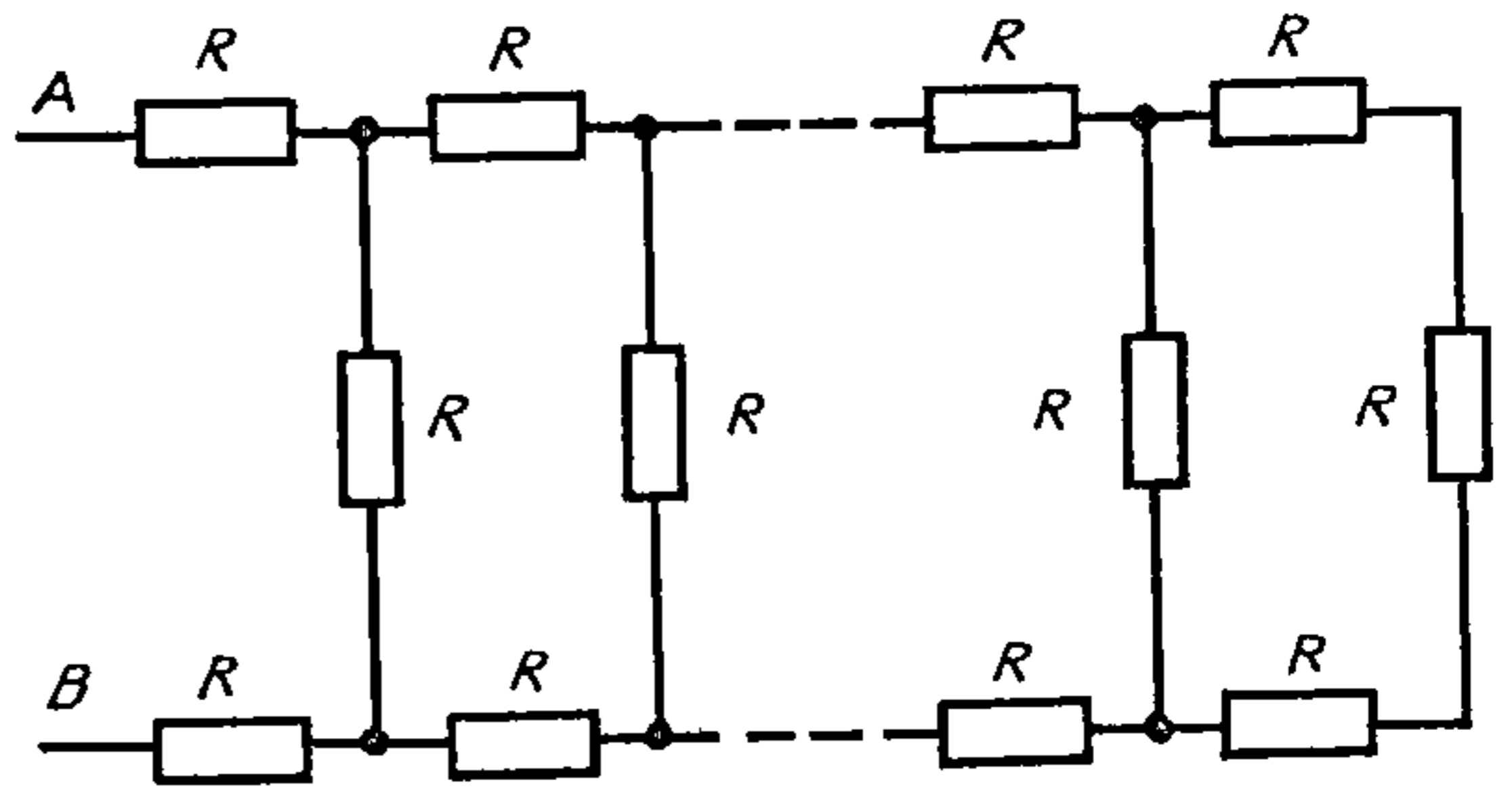


Рис.18.10

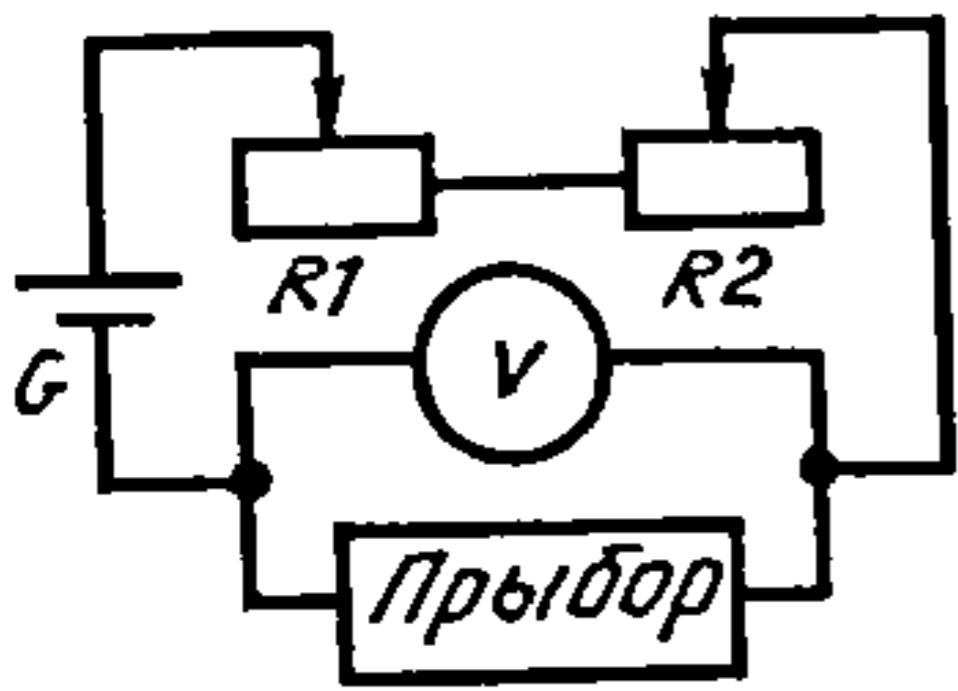


Рис.18.11

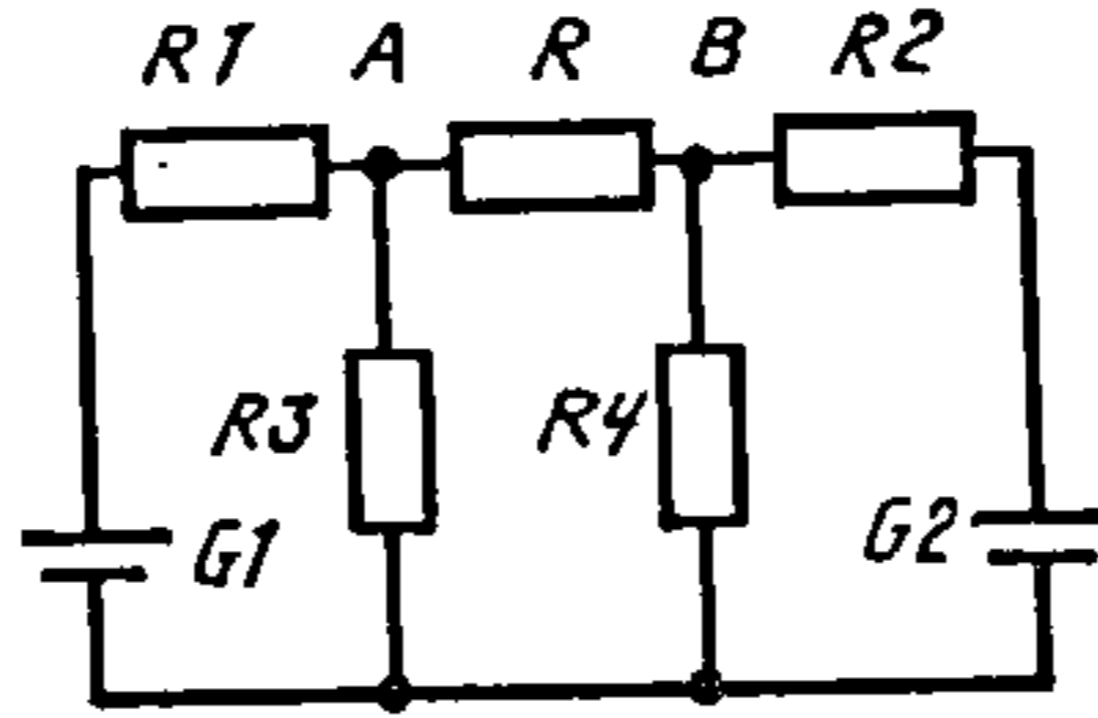


Рис.18.12

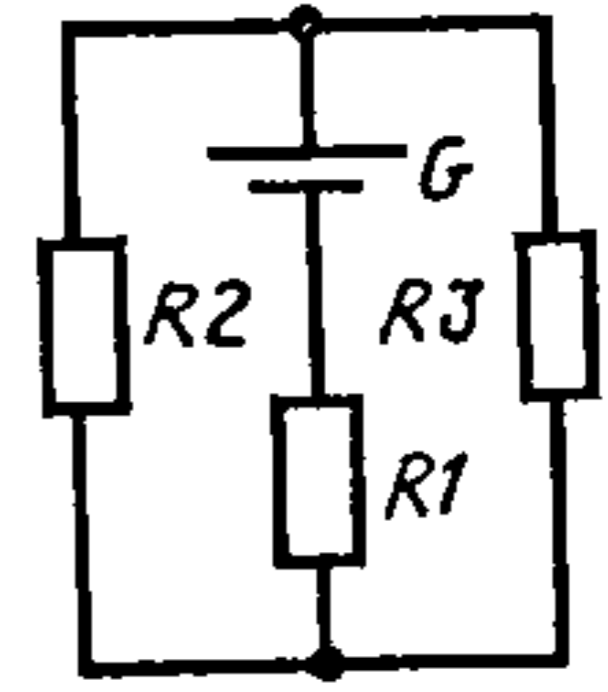


Рис.18.13

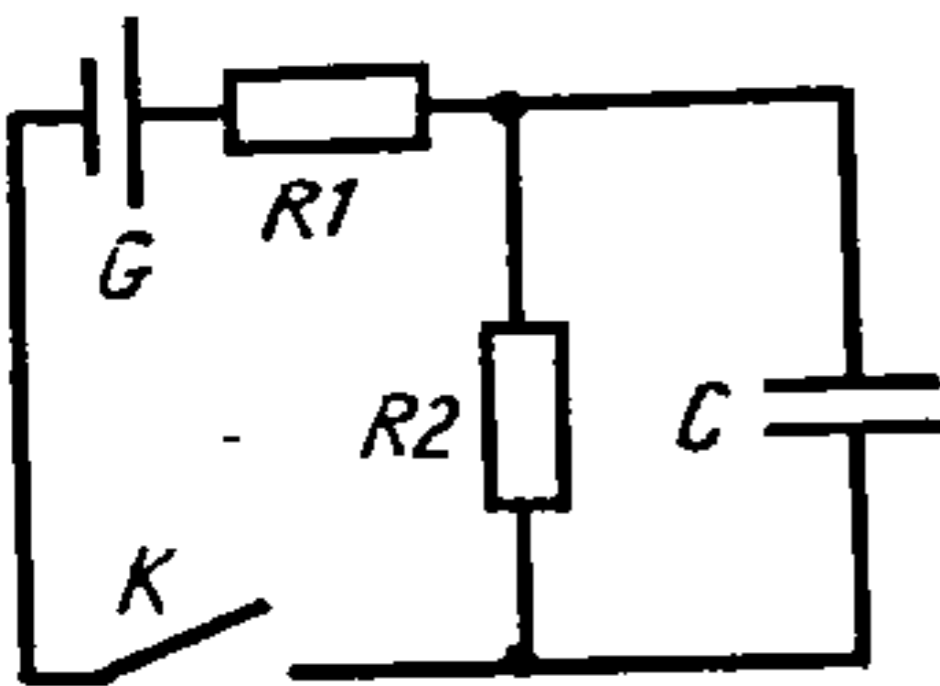


Рис.18.14

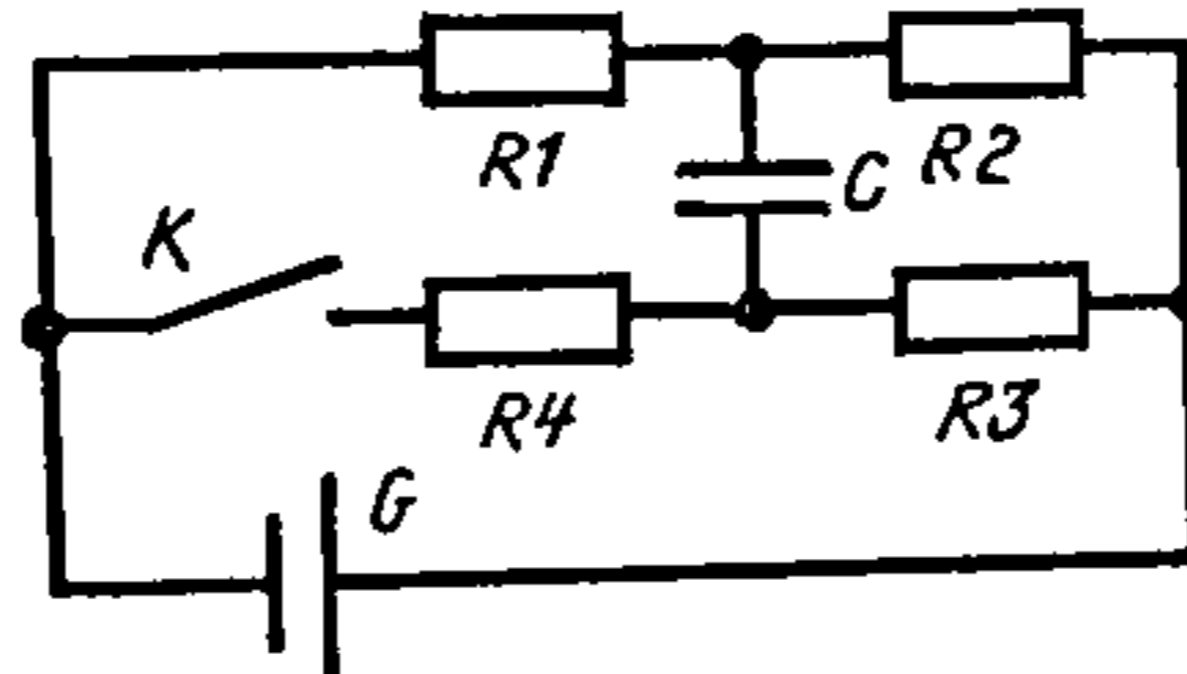


Рис.18.15

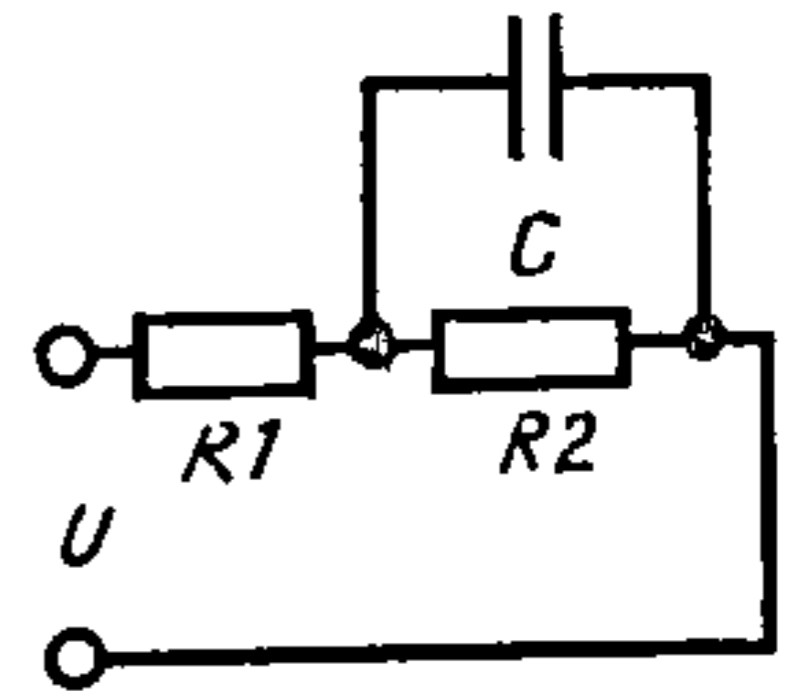


Рис.18.16 \*

рзастат? Як патрэбна ўключыць рэастаты, калі для сілкавання прыбора ўстанаўліваецца як мага дакладней не напружанне, а сіла току?

18.18. Пры якой умове праз праваднік супраціўленнем  $R$ , што падключаны ў пунктах  $A$  і  $B$  (рыс. 18.12), не будзе ісці ток? Унутранае супраціўленне крыніцы току не ўлічваць.

18.19. У ланцугу (рыс. 18.13)  $\mathcal{E} = 3,0$  В,  $r = 0,8$  Ом,  $R_1 = 0,6$  Ом,  $R_2 = 2,0$  Ом,  $R_3 = 8,0$  Ом. Знайсці сілу току ў  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .

18.20. У ланцугу (рыс. 18.14) цячэ пастаянны ток. Ключ  $K$  размыкаюць. Праз які прыблізна час зарад на кандэнсатары паменшыцца на  $1/1000$  свайго першапачатковага значэння?

18.21. Кандэнсатар ёмістасцю  $C = 10,0$  мкФ уключаны ў ланцуг пастаяннага току (рыс. 18.15). Вызначыць змяненне зараду на кандэнсатары пасля замыкання ключа  $K$ , калі  $R_1 = 2,0$  Ом,  $R_2 = R_4 = 1,0$  Ом,  $\mathcal{E} = 10,0$  В,  $R_3 = 5,0$  Ом.

18.22. Знайсці зарад на кандэнсатары ёмістасцю  $C$ , калі ў ланцугу (рыс. 18.16) цячэ пастаянны ток. Напружанне на клеммах  $U$ , супраціўленне ў ланцугу  $R_1$  і  $R_2$ .

18.23. Ёсць батарэя з ЭРС  $\mathcal{E} = 100$  В і ўнутраным супраціўленнем  $r = 2$



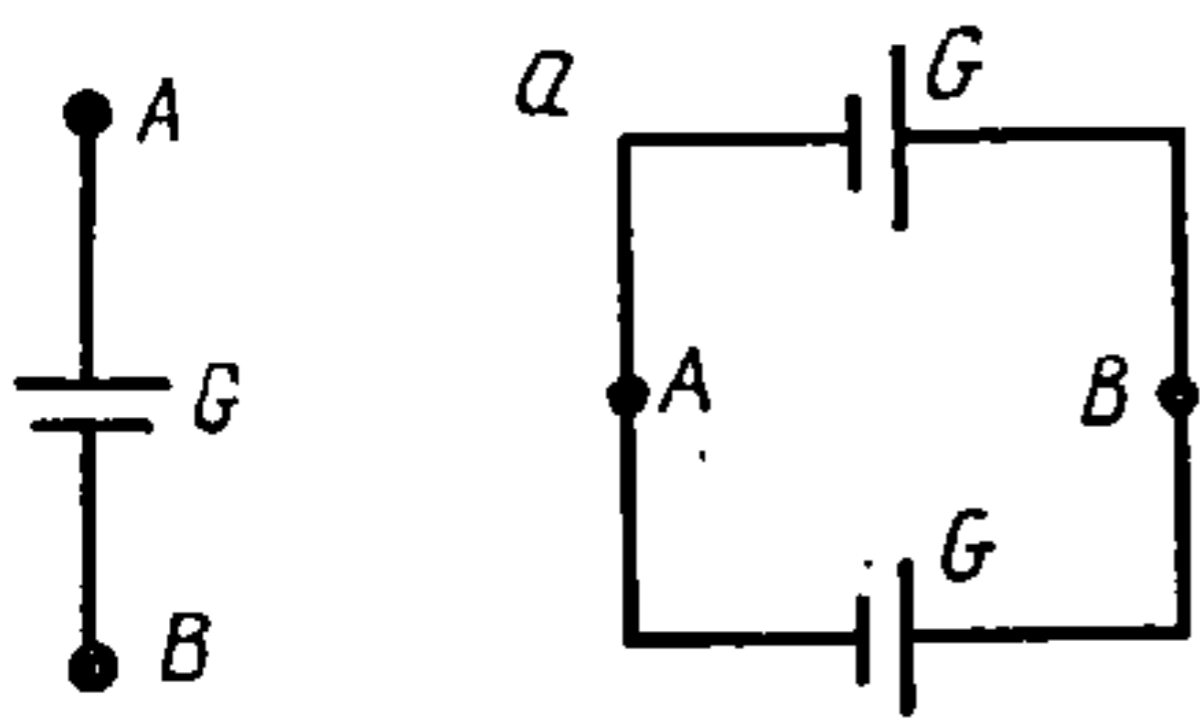


Рис.18.17

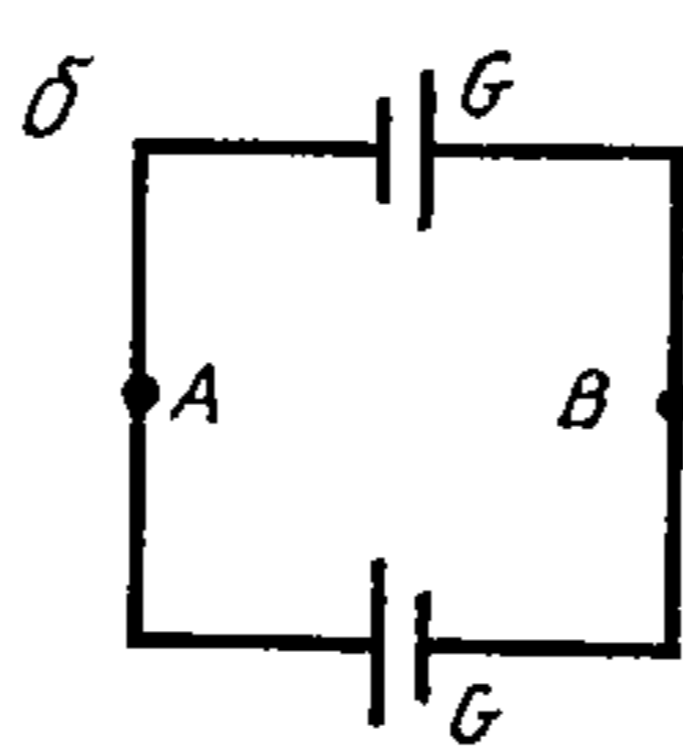


Рис.18.18

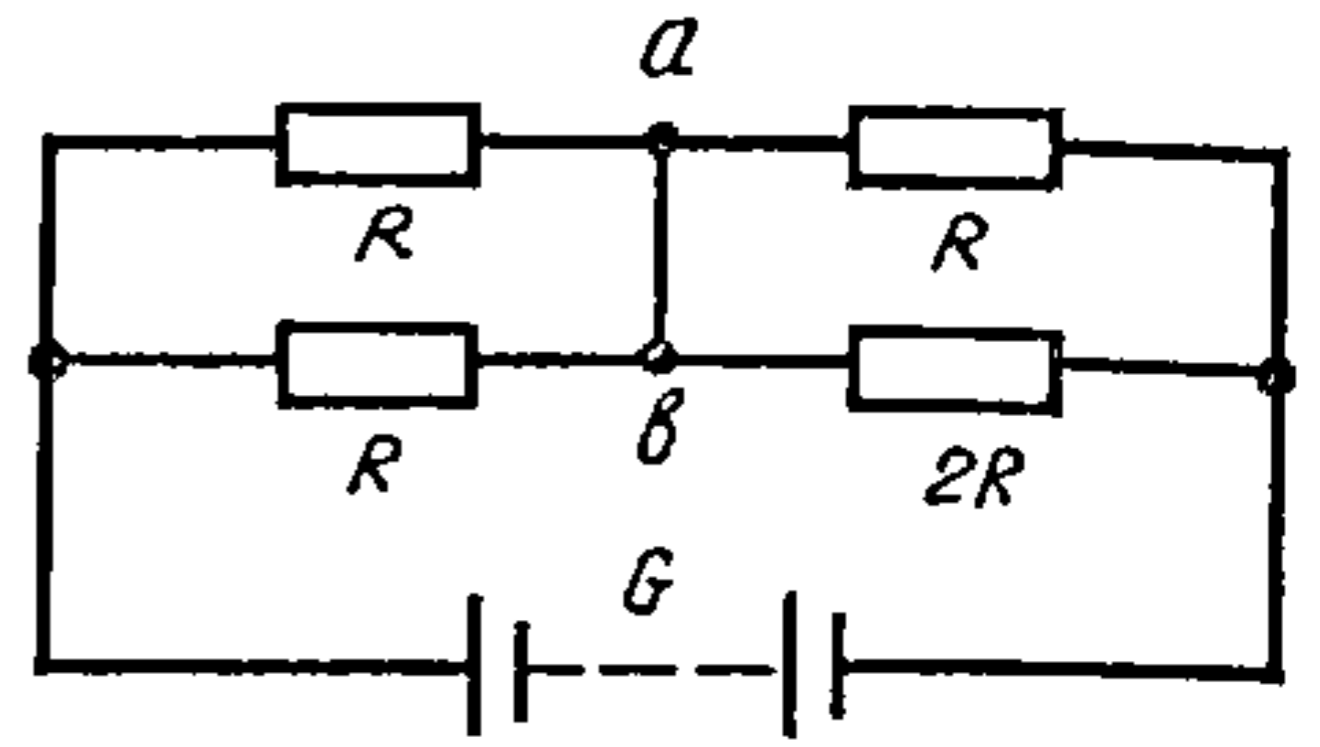


Рис.18.19

Ом. На нагрузцы патрэбна атрымаць напружанне  $U = 20$  В, прычым змяненне супраціўлення  $R$  ад 50 да 100 Ом павінна выклікаць змяненне напружання на ёй не больш чым на 2 %. Складзі простую схему для сілкавання нагрузкі і разлічыць параметры гэтай схемы.

18.24. Вызначыць сілу току на ўчастку  $AB$  (рыс. 18.17). ЭРС крыніцы  $\mathcal{E} = 20$  В, унутранае супраціўленне  $r = 1$  Ом, патэнцыялы пунктаў  $A$  і  $B$   $\varphi_A = 15$  В і  $\varphi_B = 5$  В, супраціўленне правадоў  $R = 3$  Ом.

18.25. Два аднолькавыя элементы злучаны паміж сабою так, як паказана на рыс. 18.18,  $a$  і  $b$ . Вызначыць напружанне паміж пунктамі  $A$  і  $B$ .

18.26. Знайсці сілу току, які праходзіць праз перамычку  $ab$  (рыс. 18.19), калі лічыць, што супраціўленне перамычкі, падводзячых правадоў і ўнутранае супраціўленне батарэі вельмі малыя.

18.27. Да аднаго канца двухправаднай лініі перадачы электраэнергіі далучана крыніца пастаяннай ЭРС, а да другога — спажывец супраціўленнем  $R_0$ . У лініі адбылося пашкоджанне ізаляцыі, у выніку чаго сіла току ў крыніцы павялічылася ў 2 разы, а сіла току ў нагрузцы  $R_0$  паменшылася ў 8 разоў. Знайсці супраціўленне ізаляцыі на месцы пашкоджання, калі даўжыня кожнага провада лініі  $l$ , а супраціўленне адзінкі даўжыні провада  $\rho$ .

### Правіла Кірхгофа

18.28. Як на мосціку Уітстана вымераць супраціўленне гальванометра, які звычайна ўключаюць у дыяганаль маста, не карыстаючыся другім гальванометрам? Унутранае супраціўленне крыніцы току не ўлічваць.

18.29. Знайсці сілу току ў кожнай галіне мосціка Уітстана (рыс. 18.20), калі ЭРС крыніцы току  $\mathcal{E} = 2$  В,  $R_1 = 30$  Ом,  $R_2 = 45$  Ом,  $R_3 = 200$  Ом і гальванометр паказвае сілу току, роўную нулю. Унутранае супраціўленне крыніцы току не ўлічваць.

18.30. У плечы мосціка Уітстана (рыс. 18.21) уключаны рэзістары з вядомымі супраціўленнямі  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  і да яго прыкладзена напружанне  $U$ . Знайсці супраціўленне  $R_1$ , калі гальванометр супраціўленнем  $r$  паказвае сілу току  $I$ . Унутранае супраціўленне крыніцы току не ўлічваць.

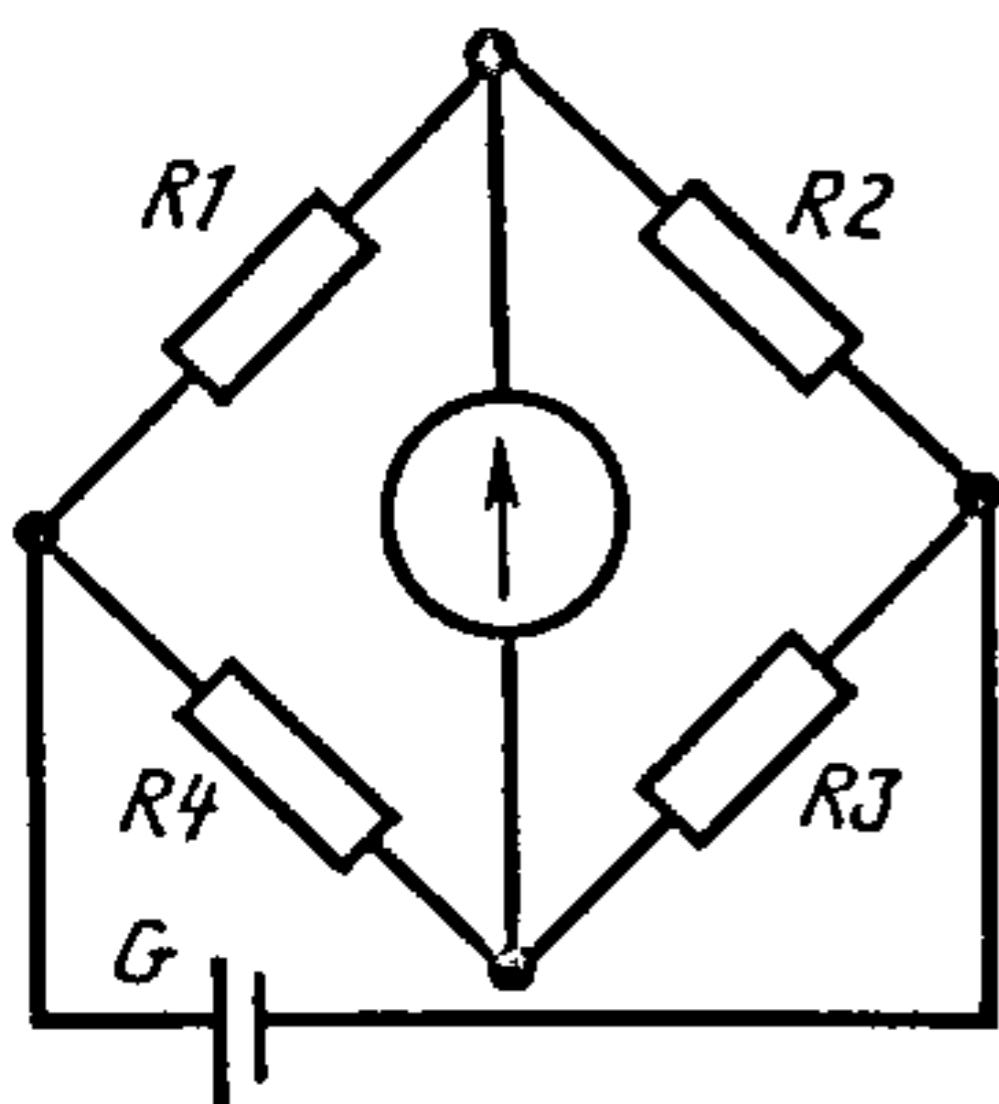
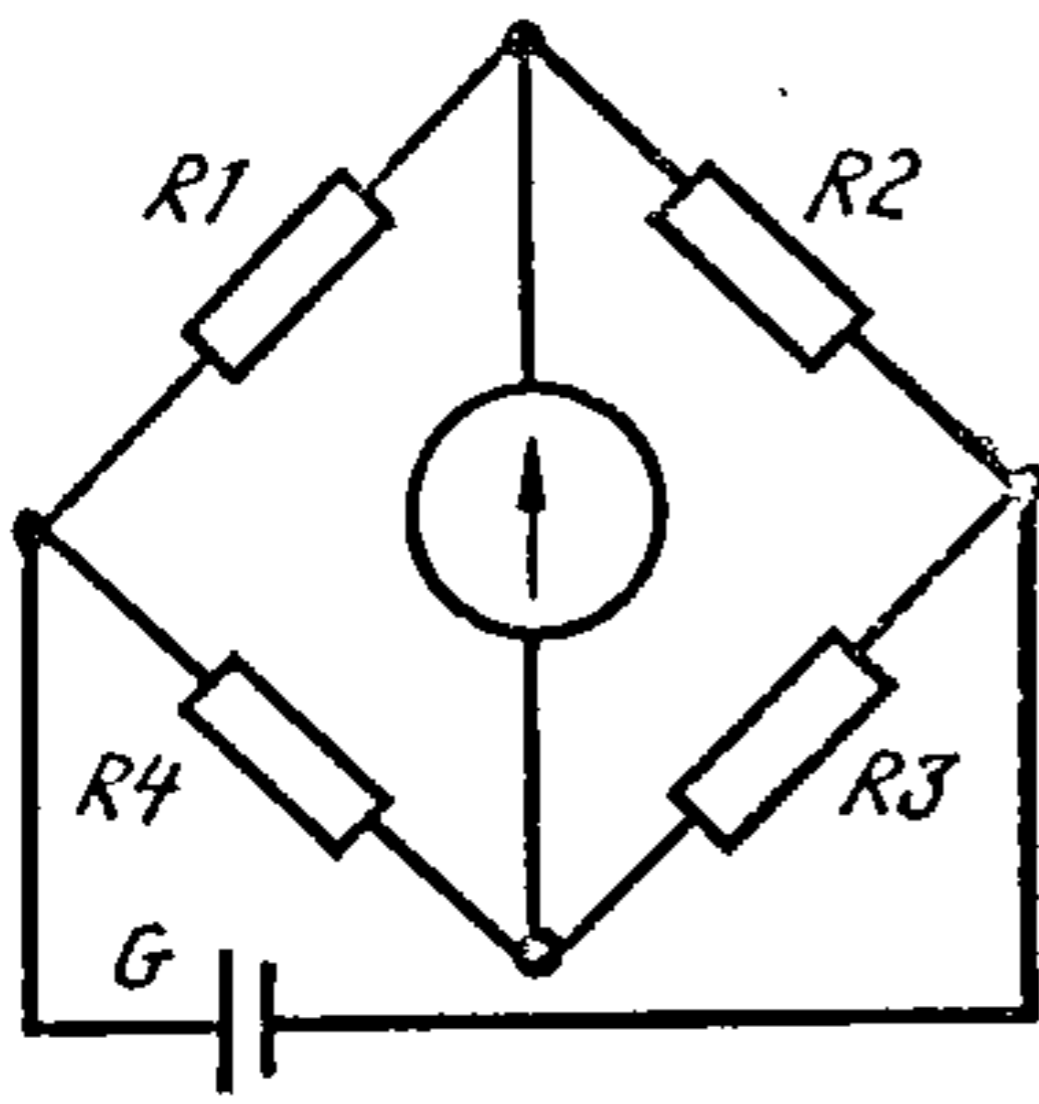
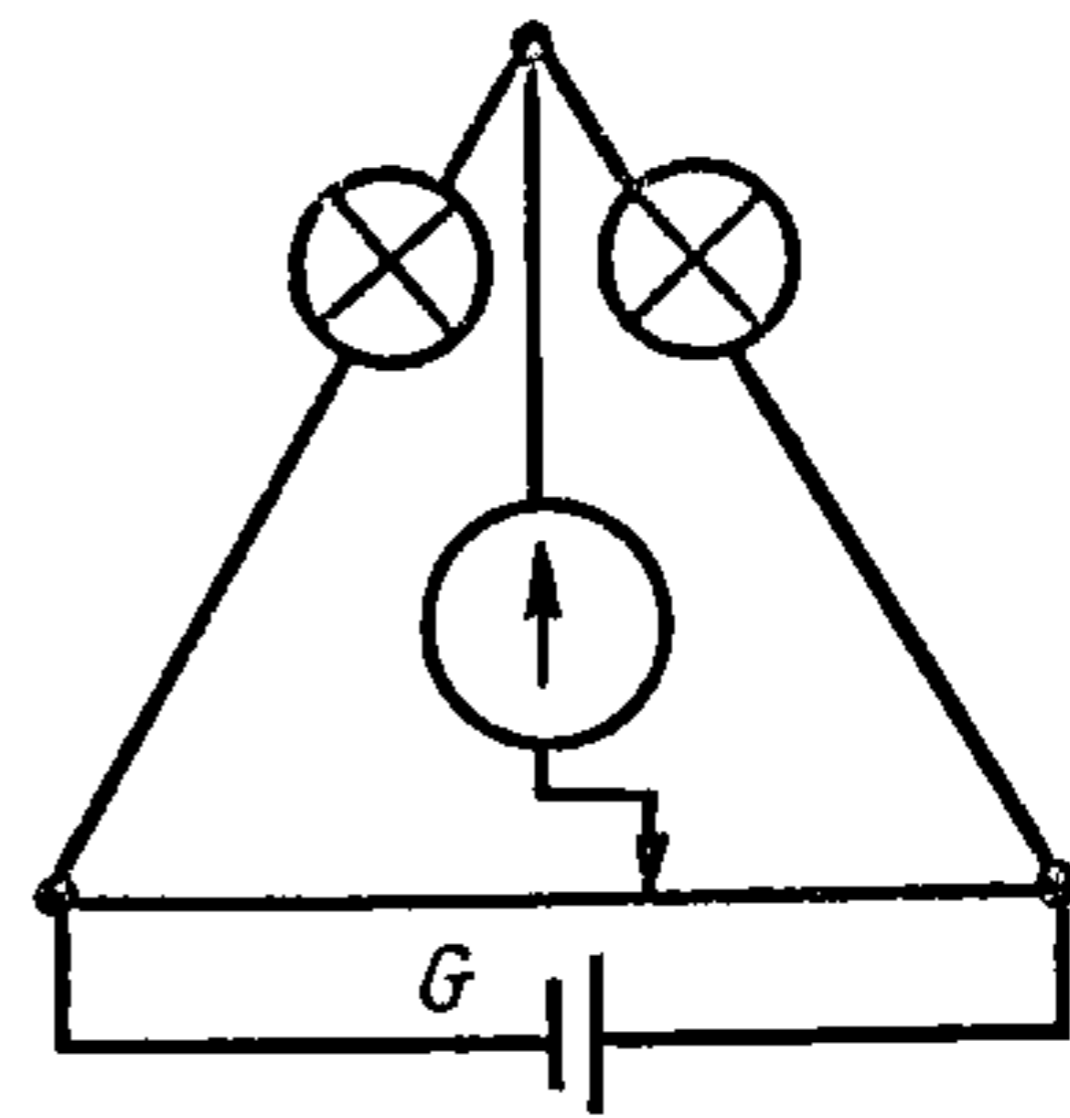


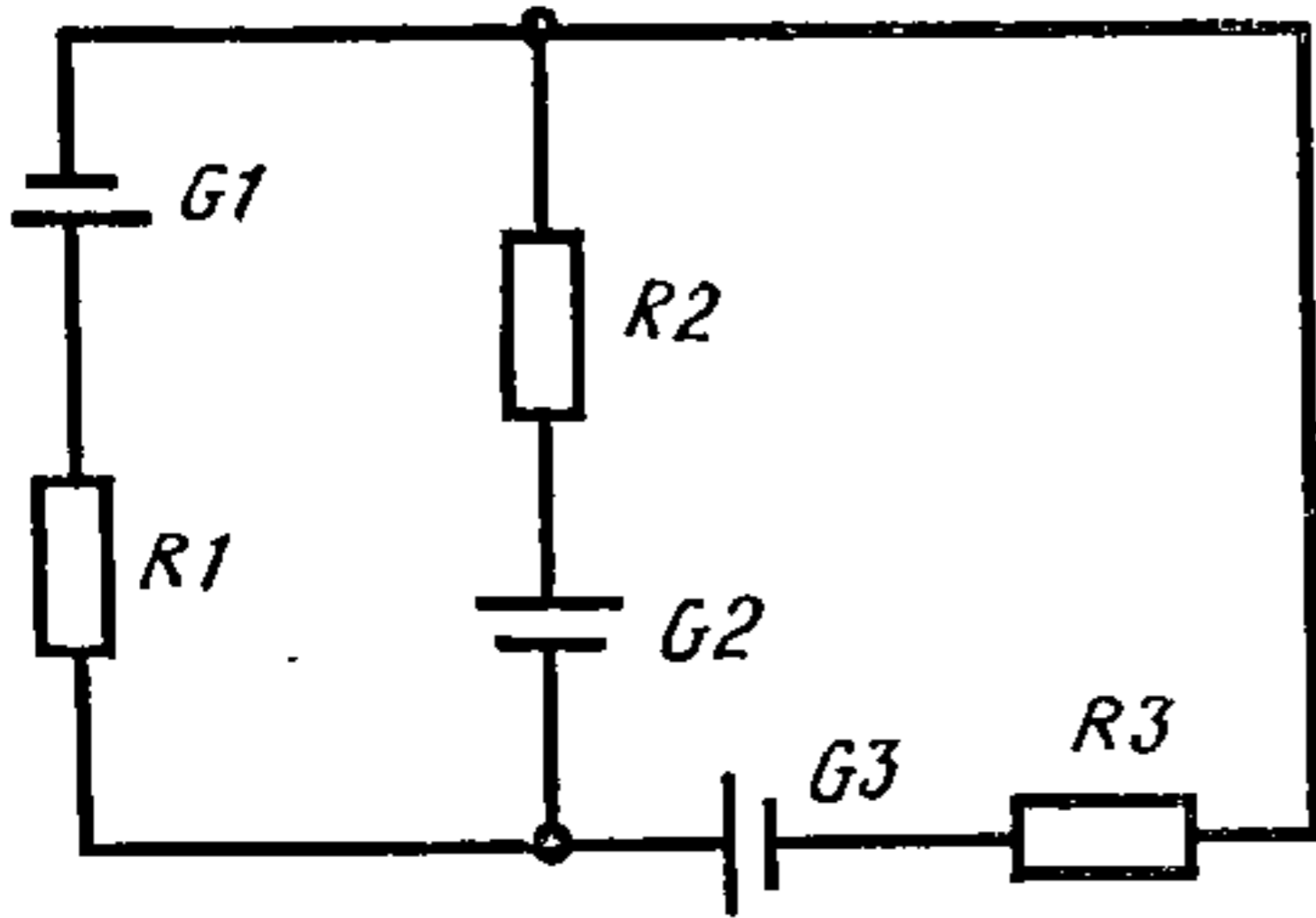
Рис.18.20



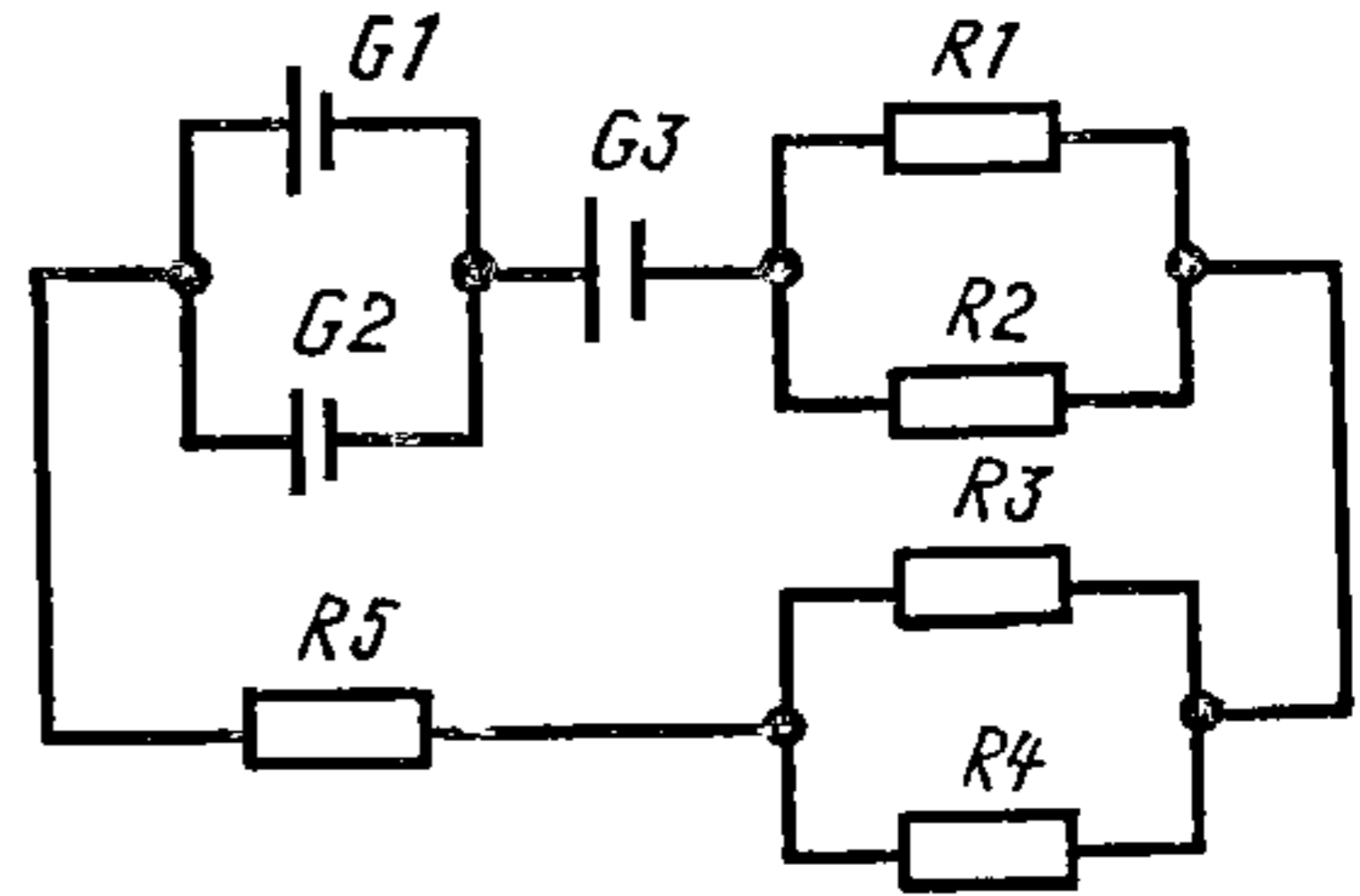
Рыс.18.21



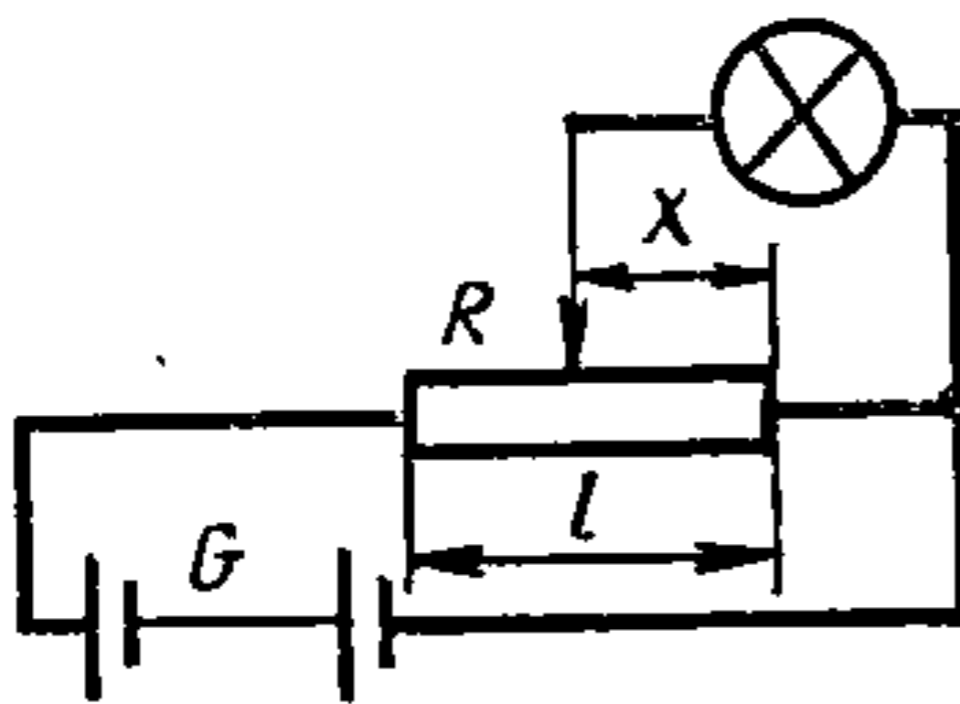
Рыс.18.22



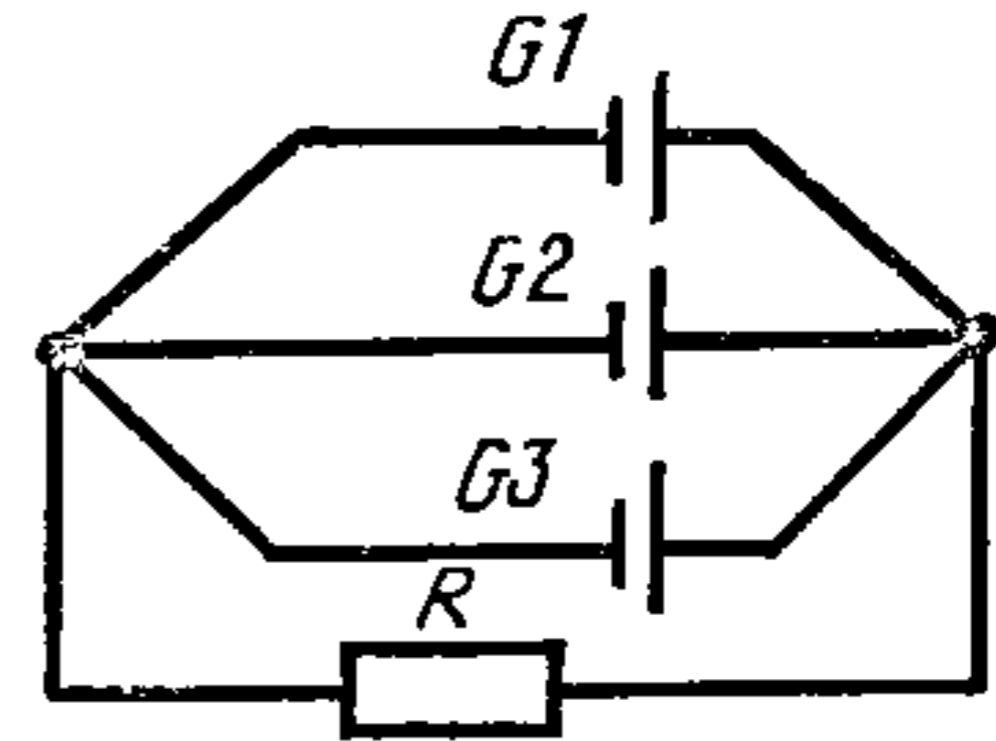
Рыс.18.23



Рыс.18.24



Рыс.18.25



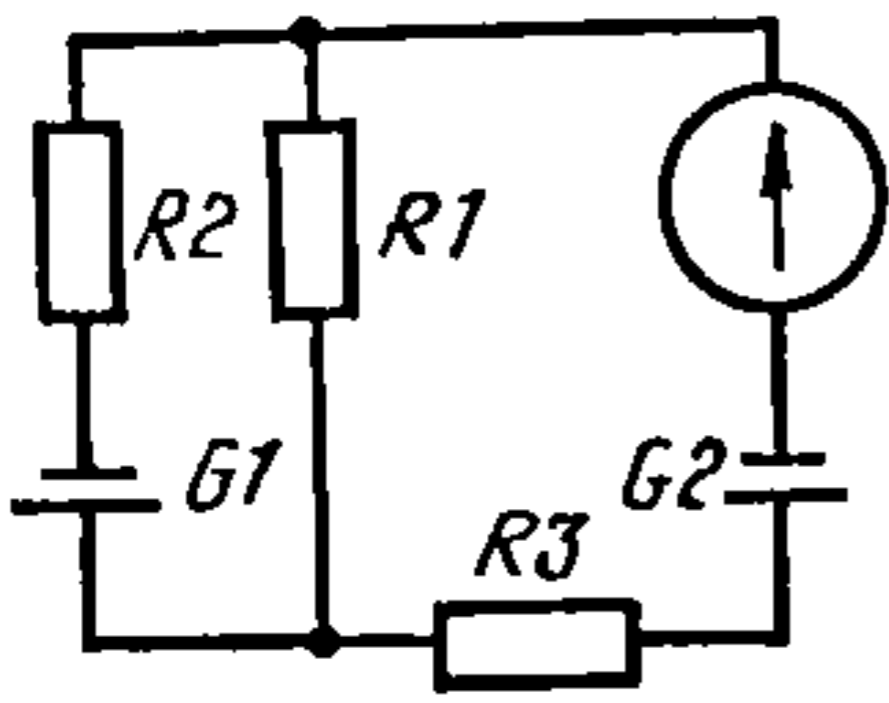
Рыс.18.26

18.31. У плечы мосціка Уітстана ўключаны дзве лямпачкі аднолькавай магутнасці (рыс. 18.22), разлічаныя на 110 і 220 В адпаведна. Знайсці адносіну супраціўленняў  $R_1 / R_2$  плеч пры ўмове раўнавагі мосціка, не ўлічваючы ўнутранае супраціўленне крыніцы току.

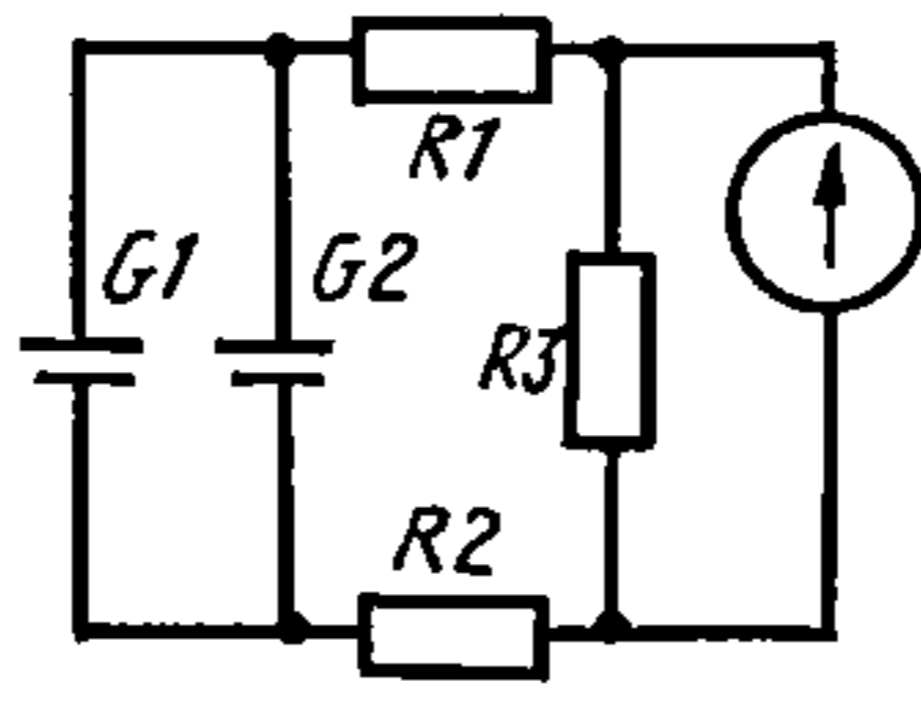
18.32. Знайсці сілу току ў кожнай галіне ланцуга (рыс. 18.23), калі ЭРС крыніц токаў роўныя  $\mathcal{E}_1 = 1\text{В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 3\text{В}$ ,  $\mathcal{E}_3 = 5\text{В}$ , а супраціўленні  $R_1 = 2\text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4\text{ Ом}$ ,  $R_3 = 2\text{ Ом}$ . Унутранае супраціўленне крыніц току не ўлічваць.

18.33. Знайсці сілу току ў ланцугу (рыс. 18.24), калі ў кожнага элемента ЭРС  $\mathcal{E} = 2,2\text{ В}$  і ўнутранае супраціўленне  $20\text{ мОм}$ , а  $R_1 = R_2 = 2,0\text{ Ом}$ ,  $R_3 = 6,0\text{ Ом}$ ,  $R_4 = 4,0\text{ Ом}$ ,  $R_5 = 0,9\text{ Ом}$ .

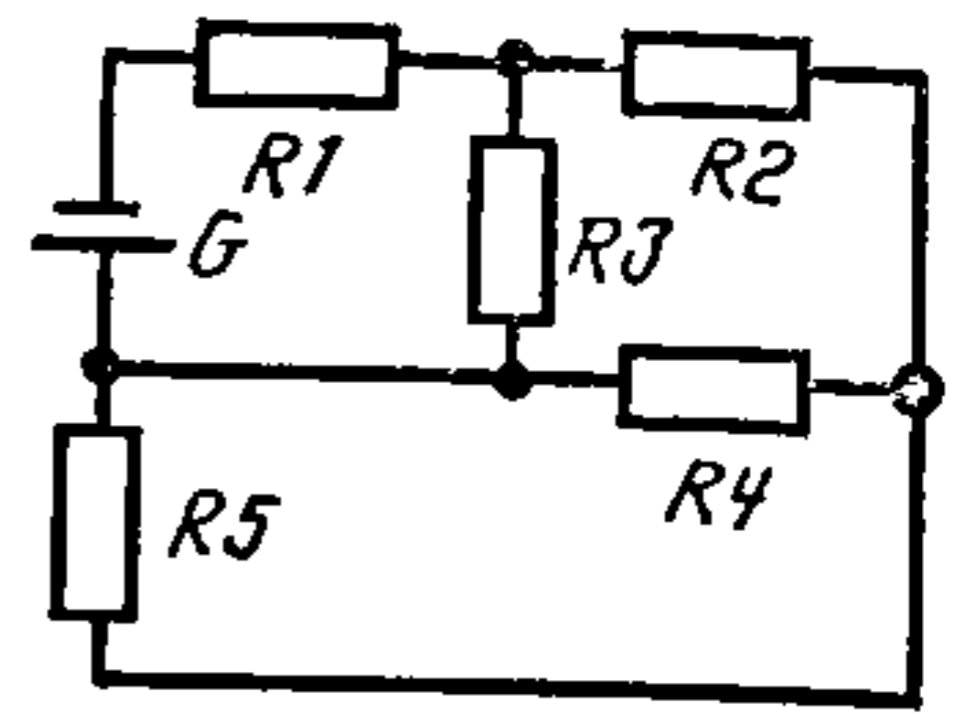
18.34. Патэнцыяметр супраціўленнем  $R$  (рыс. 18.25) знаходзіцца пад напружаннем  $U$ . Знайсці напружанне  $U_1$  на лямпачцы супраціўленнем  $R_1$  ў залежнасці ад уключанай часткі  $x$  патэнцыяметра. Унутранае суп-



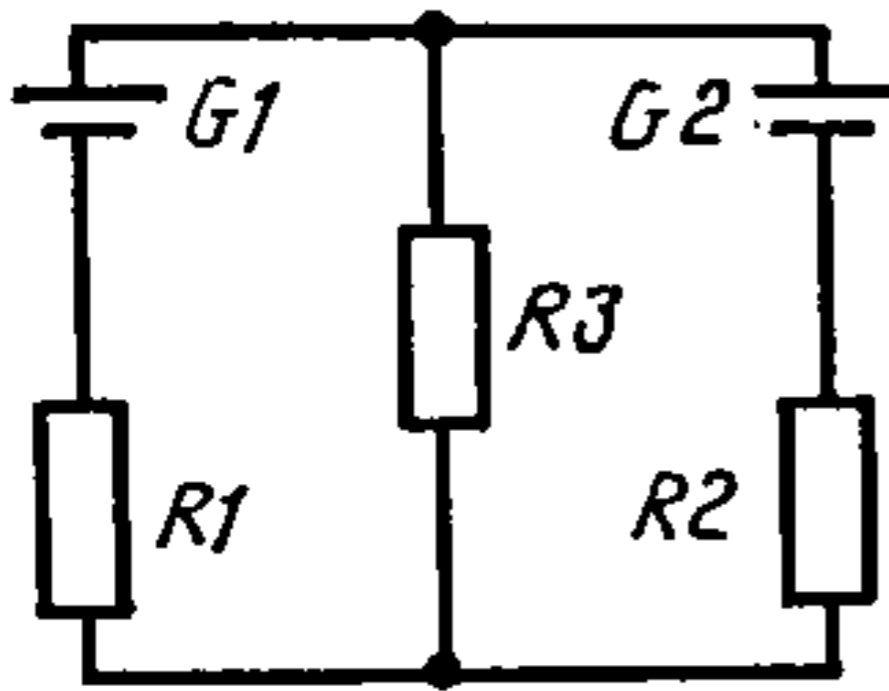
Рыс.18.27



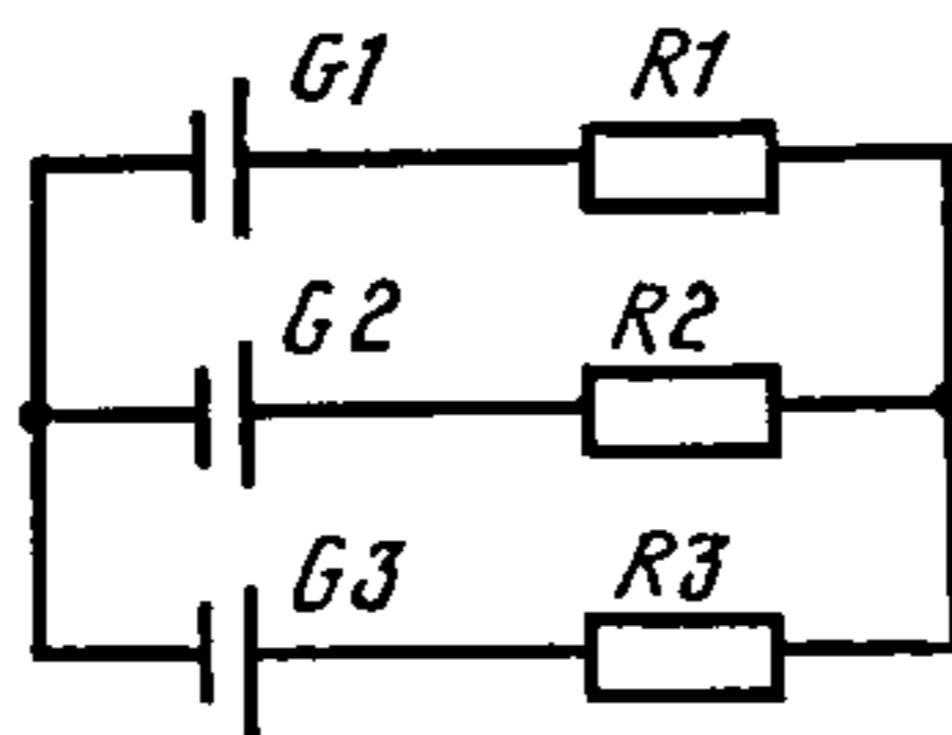
Рыс.18.28



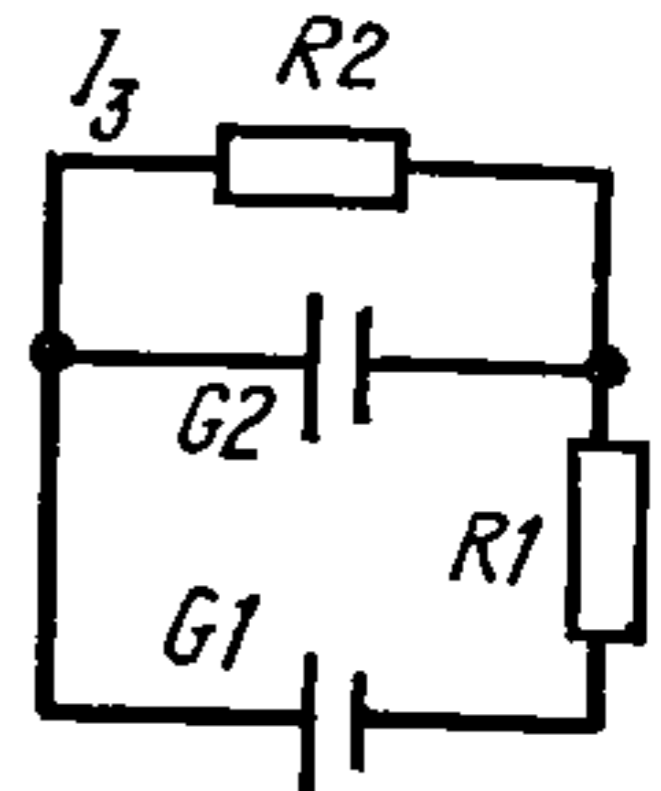
Рыс.18.29



Рыс.18.30



Рыс.18.31



Рыс.18.32

раціўленне батарэі не ўлічваць.

18.35. Знайсці сілу току ў кожным з элементаў (рыс. 18.26), унутраныя супраціўленні якіх аднолькавыя і роўныя  $0,3 \text{ Ом}$ , калі  $\mathcal{E}_1 = 1,3 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 1,4 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_3 = 1,5 \text{ В}$ ,  $R = 0,6 \text{ Ом}$ .

18.36. Знайсці сілу току гальванометра, які ўключаны ў ланцуг (рыс. 18.27), не ўлічваючы унутранае супраціўленне элементаў, калі  $\mathcal{E}_1 = 2,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 1,0 \text{ В}$ ,  $R_1 = 1,0 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 0,5 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = R_g = 0,2 \text{ кОм}$ .

18.37. Знайсці сілу току гальванометра, які ўключаны ў ланцуг (рыс. 18.28), калі  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = 1,5 \text{ В}$ ,  $r_1 = r_2 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = R_2 = 2,0 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1,0 \text{ Ом}$ ,  $R_g = 3,0 \text{ Ом}$ .

18.38. У схеме (рыс. 18.29) вядомыя сіла току  $I_4$  і супраціўленні ўсіх рэзістараў. Знайсці ЭРС батарэі, не ўлічваючы яе ўнутранае супраціўленне.

18.39. Знайсці сілу току ва ўсіх участках ланцуга (рыс. 18.30), калі  $\mathcal{E}_1 = 24 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 18 \text{ В}$ ,  $R_1 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = R_3 = 2 \text{ Ом}$ . Унутранае супраціўленне крыніц не ўлічваць.

18.40. Тры крыніцы току з ЭРС  $\mathcal{E}_1 = 10,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 5,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_3 = 6,0 \text{ В}$  і ўнутранымі супраціўленнямі  $r_1 = 0,1 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 0,2 \text{ Ом}$ ,  $r_3 = 0,1 \text{ Ом}$  злучаны, як паказана на рыс. 18.31. Вызначыць напружанне на рэзістарах, супраціўленні якіх  $R_1 = 5,0 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 1,0 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 3,0 \text{ Ом}$ .

18.41. Знайсці сілу току ва ўсіх участках ланцуга (рыс. 18.32), калі  $\mathcal{E}_1 = 20,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 33,0 \text{ В}$ ,  $r_1 = 0,2 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 0,8 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2,0 \text{ Ом}$ .

18.42. Вызначыць сілу току ва ўсіх участках ланцуга (рыс. 18.33), калі  $\mathcal{E}_1 = 27,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 30,0 \text{ В}$ ,  $r_1 = 30,0 \text{ мОм}$ ,  $r_2 = 50,0 \text{ мОм}$ ,  $R_1 = R_2 = R_5 = 8,0 \text{ Ом}$ ,



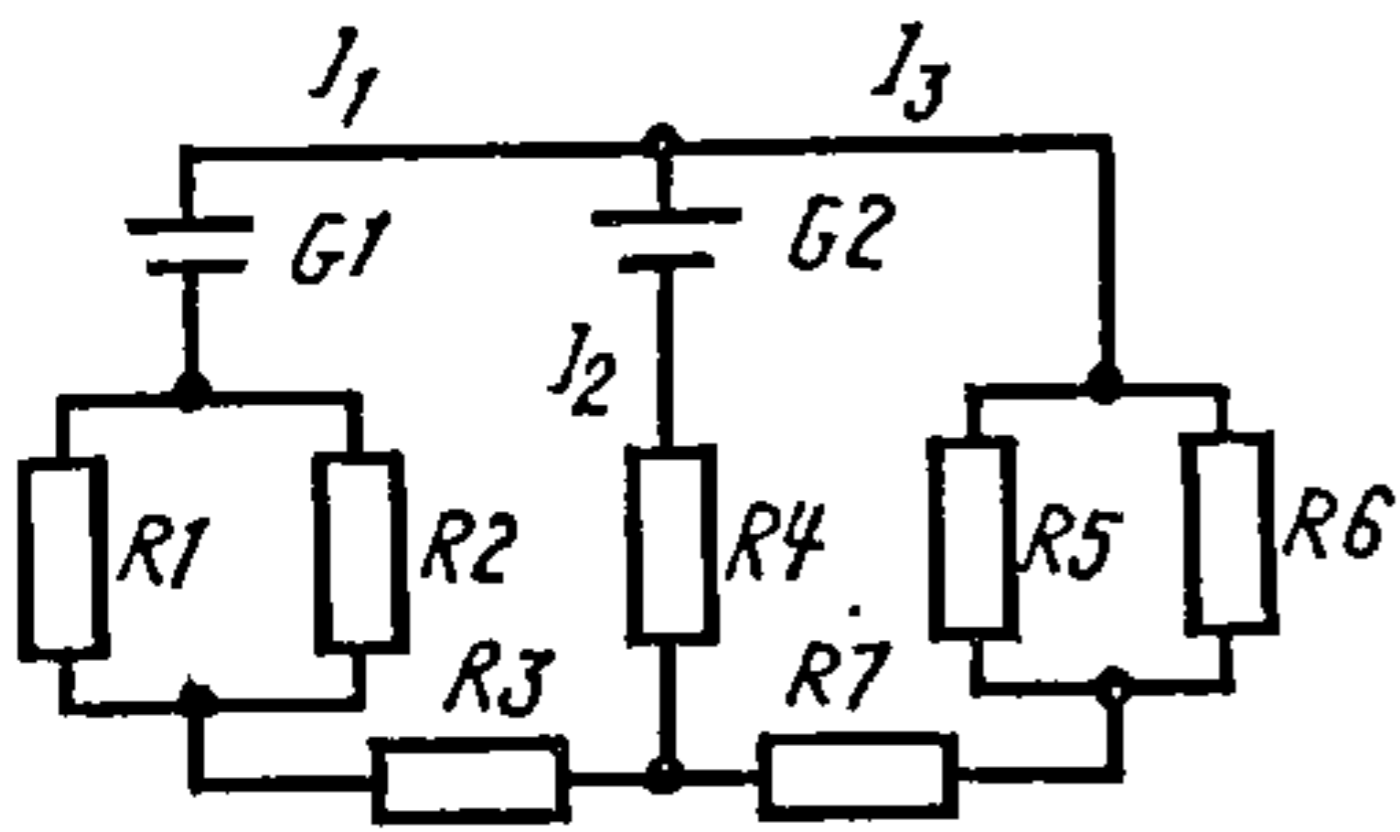


Рис.18.33

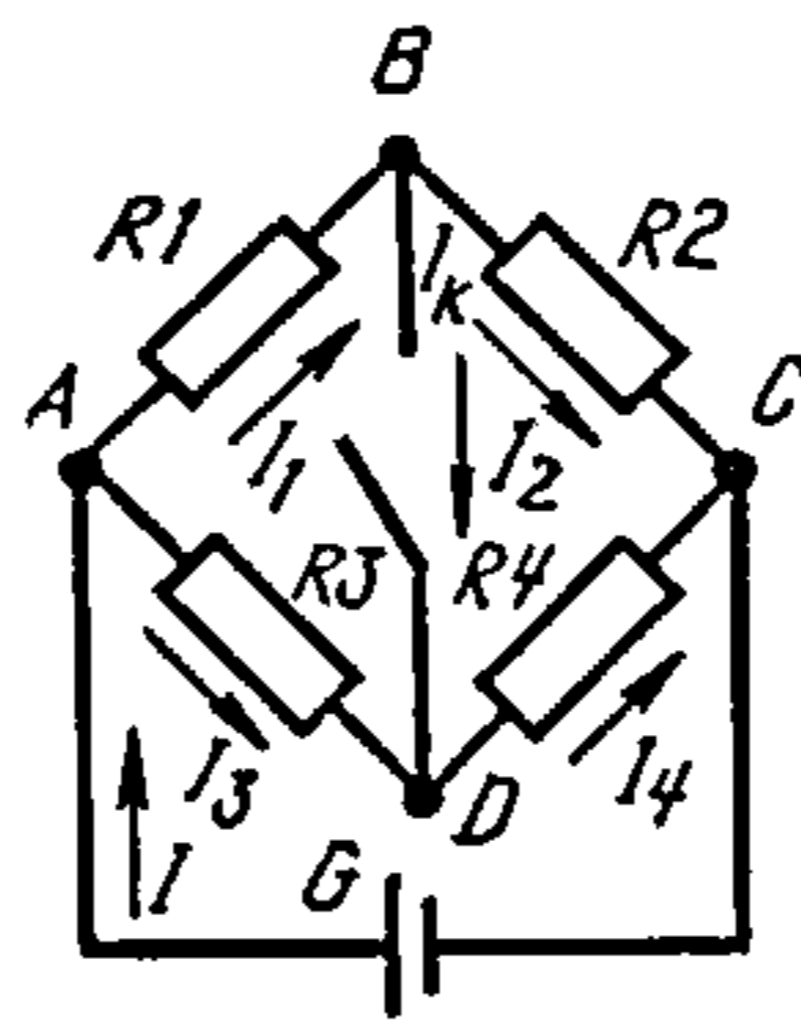


Рис.18.34

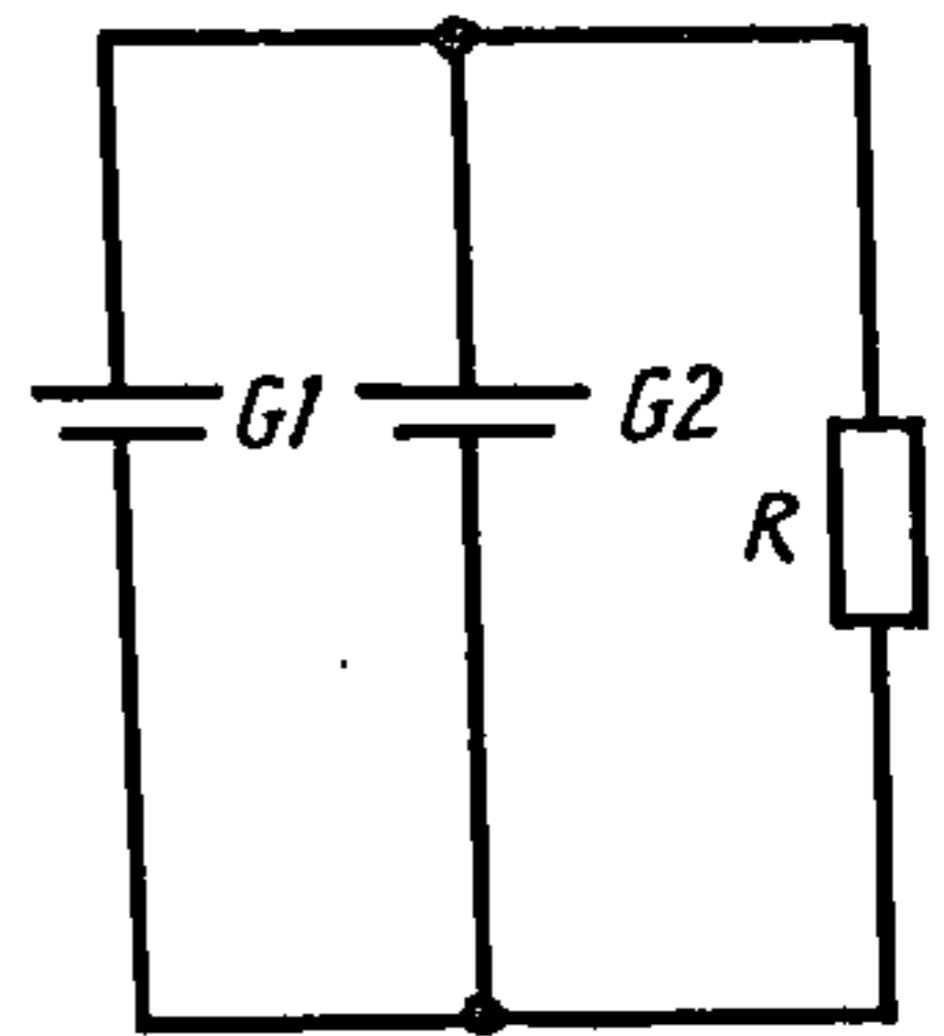


Рис.18.35

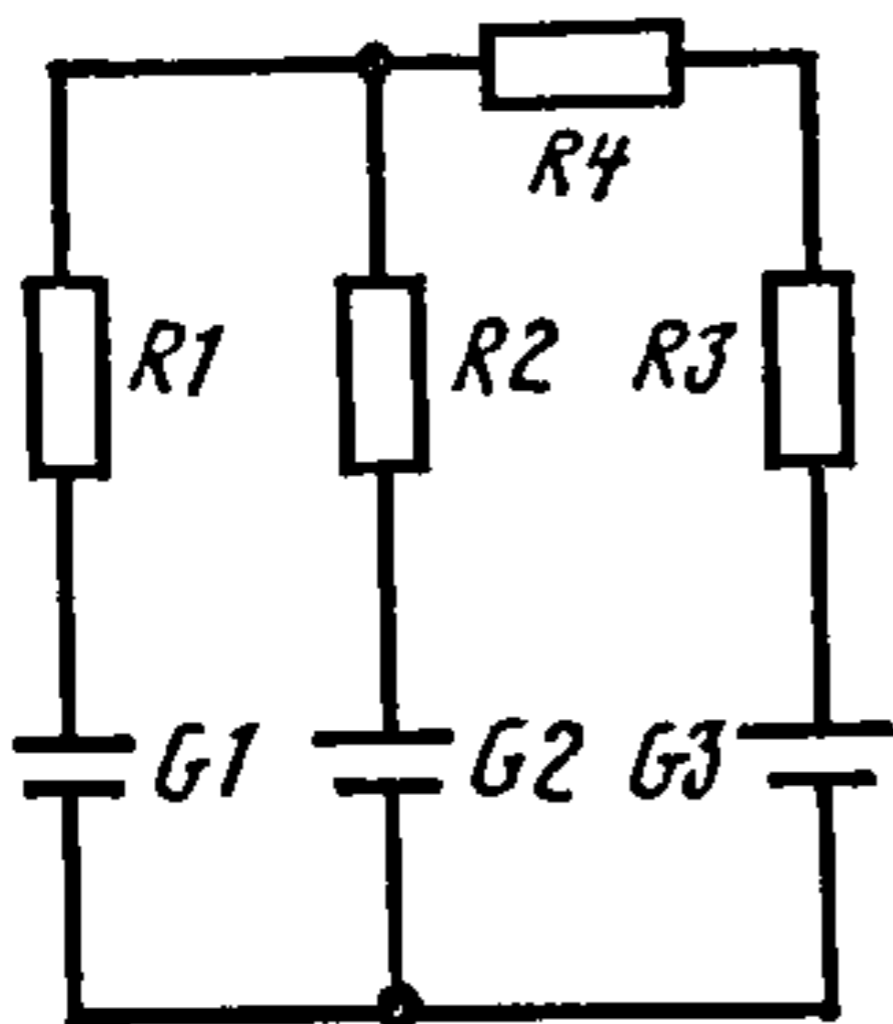


Рис.18.36

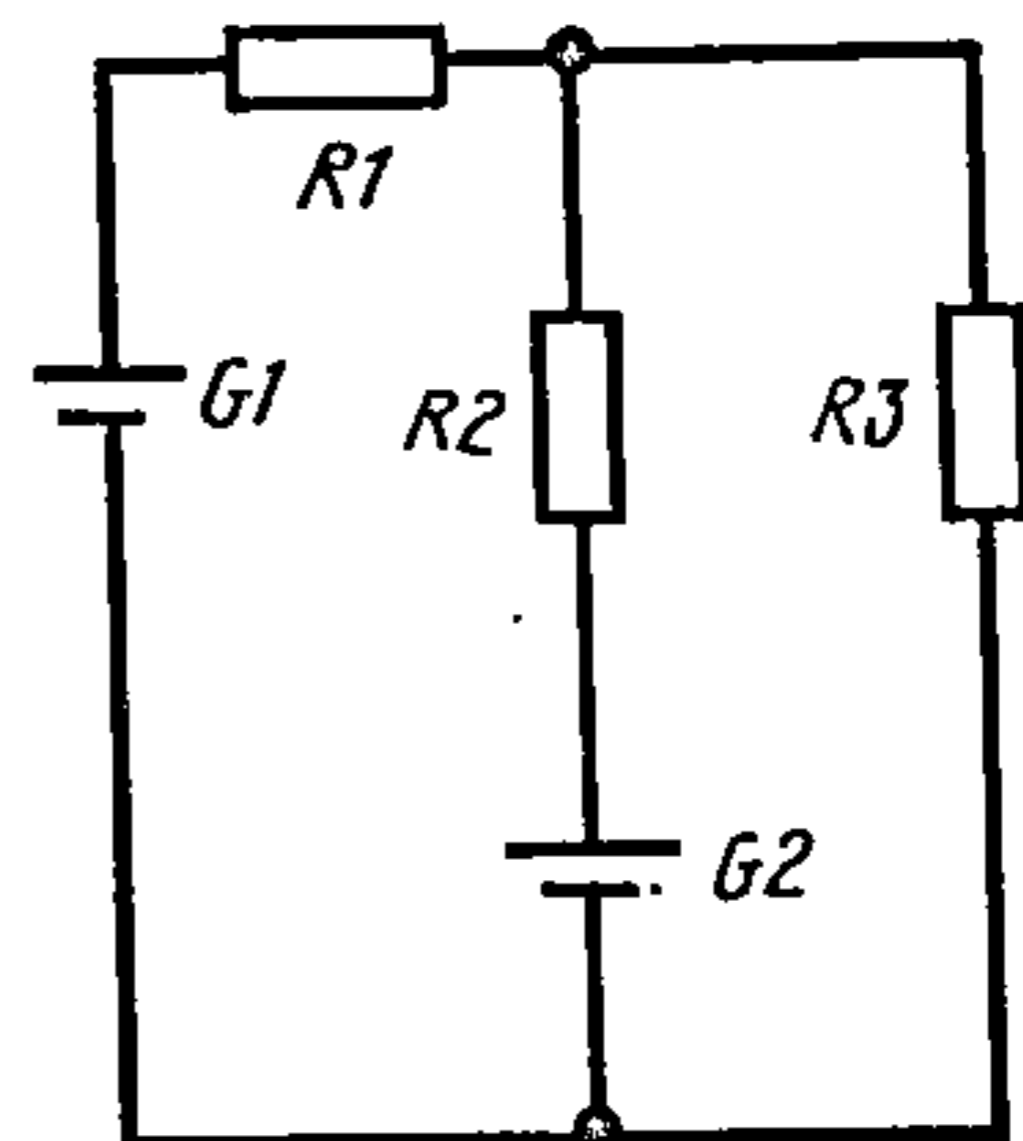


Рис.18.37

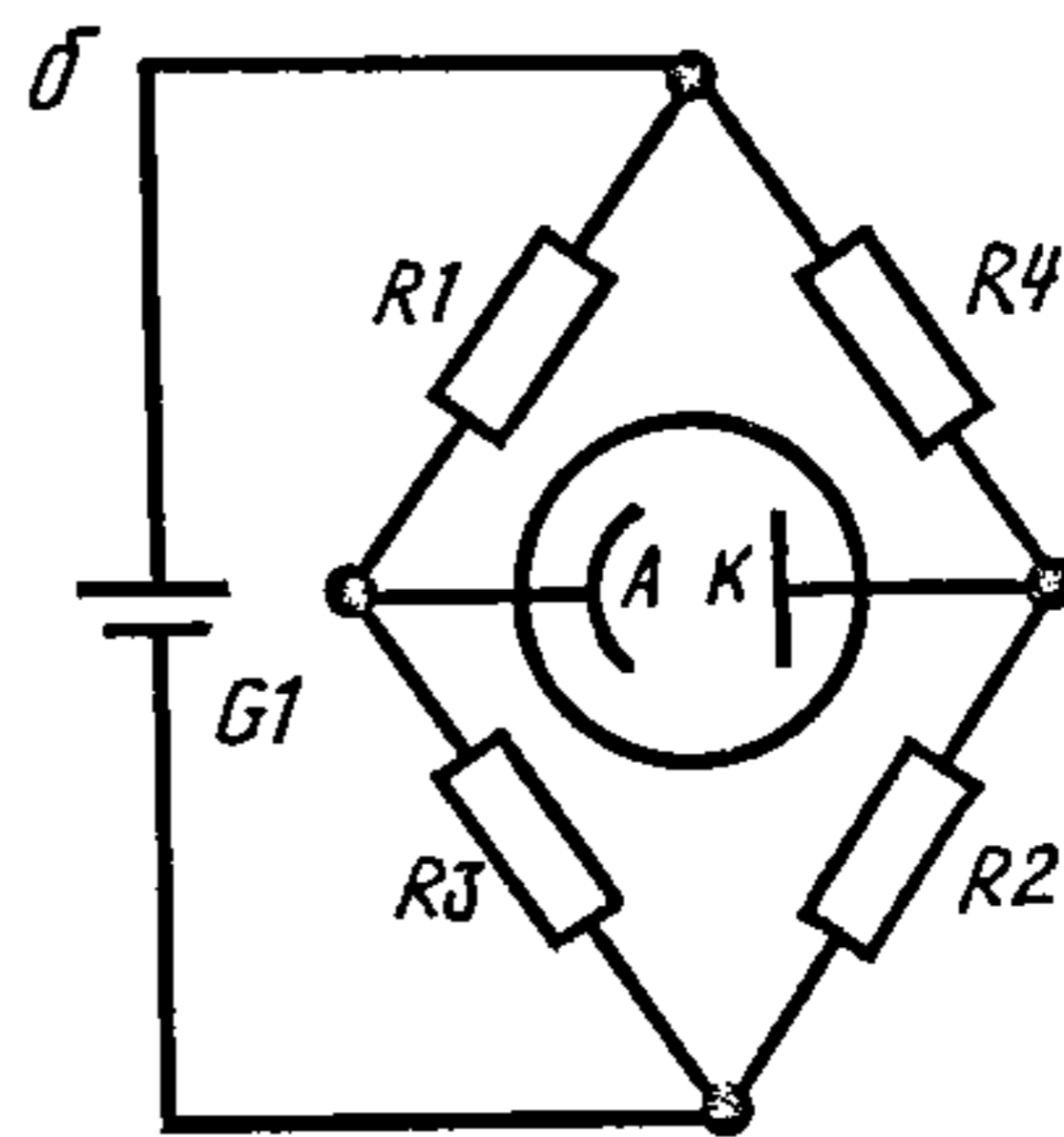
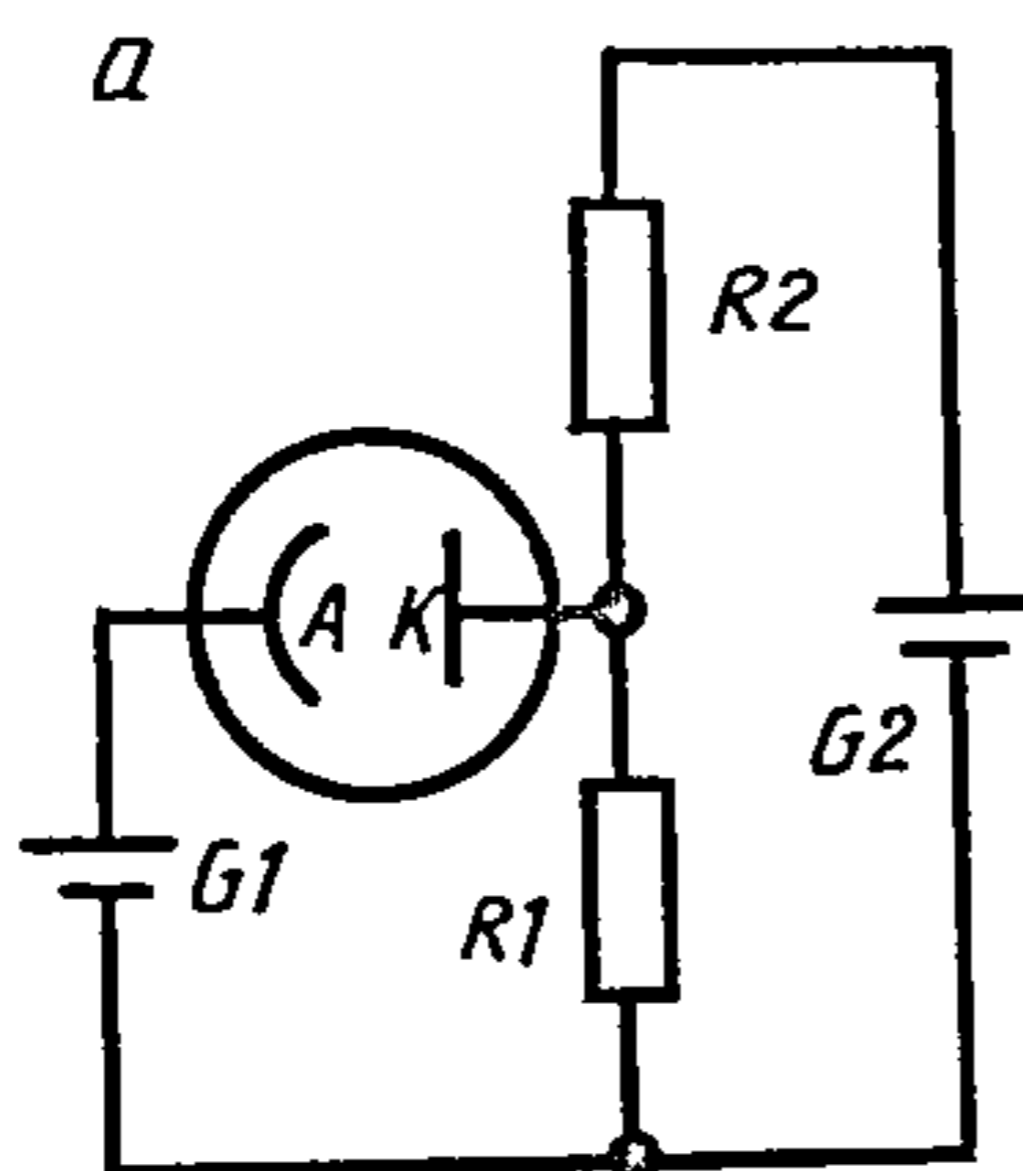


Рис.18.38

$R_3 = 1,97 \text{ Ом}, R_4 = 2,95 \text{ Ом}, R_6 = 12,0 \text{ Ом}, R_7 = 1,20 \text{ Ом}.$

18.43. Знайдіть силу току в ланцугу (рис. 18.34), сили току в асобних галінах ланцуга і еквівалентне супраціюлення при разамкнутых і замкнутых ключах, калі  $R_1 = R_2 = 10 \text{ Ом}, R_3 = 3 \text{ Ом}, R_4 = 6 \text{ Ом}, \mathcal{E} = 18 \text{ В}$ . Унутране супраціюлення крыніцы току не ўлічваць.

18.44. Дзве крыніцы току з ЭРС  $\mathcal{E}_1 = 30 \text{ В}, \mathcal{E}_2 = 16 \text{ В}$  і ўнутраным супраціюленнем  $r_1 = 1 \text{ Ом}, r_2 = 2 \text{ Ом}$  уключаны паралельна (рис. 18.35) і працуюць на агульную нагрузку супраціюленнем  $R = 25 \text{ Ом}$ . Вызначыць силу току ва ўсіх галінах і магутнасць, спажываемую нагрузкай.

18.45. Вызначыць силу току ва ўсіх участках ланцуга (рис. 18.36) і

магутнасць, якую развівае кожная крыніца току, калі  $\mathcal{E}_1 = 6,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 10,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_3 = 20,0 \text{ В}$ ,  $r_1 = 0,2 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 0,2 \text{ Ом}$ ,  $r_3 = 0,4 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 19,8 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 45,8 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 100,0 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 99,6 \text{ Ом}$ .

18.46. Вызначыць сілу току ў асобных галінах ланцуга (рыс. 18.37), калі  $\mathcal{E}_1 = 130,0 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 117,0 \text{ В}$ ,  $R_1 = 1,0 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 0,6 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 24,0 \text{ Ом}$ .

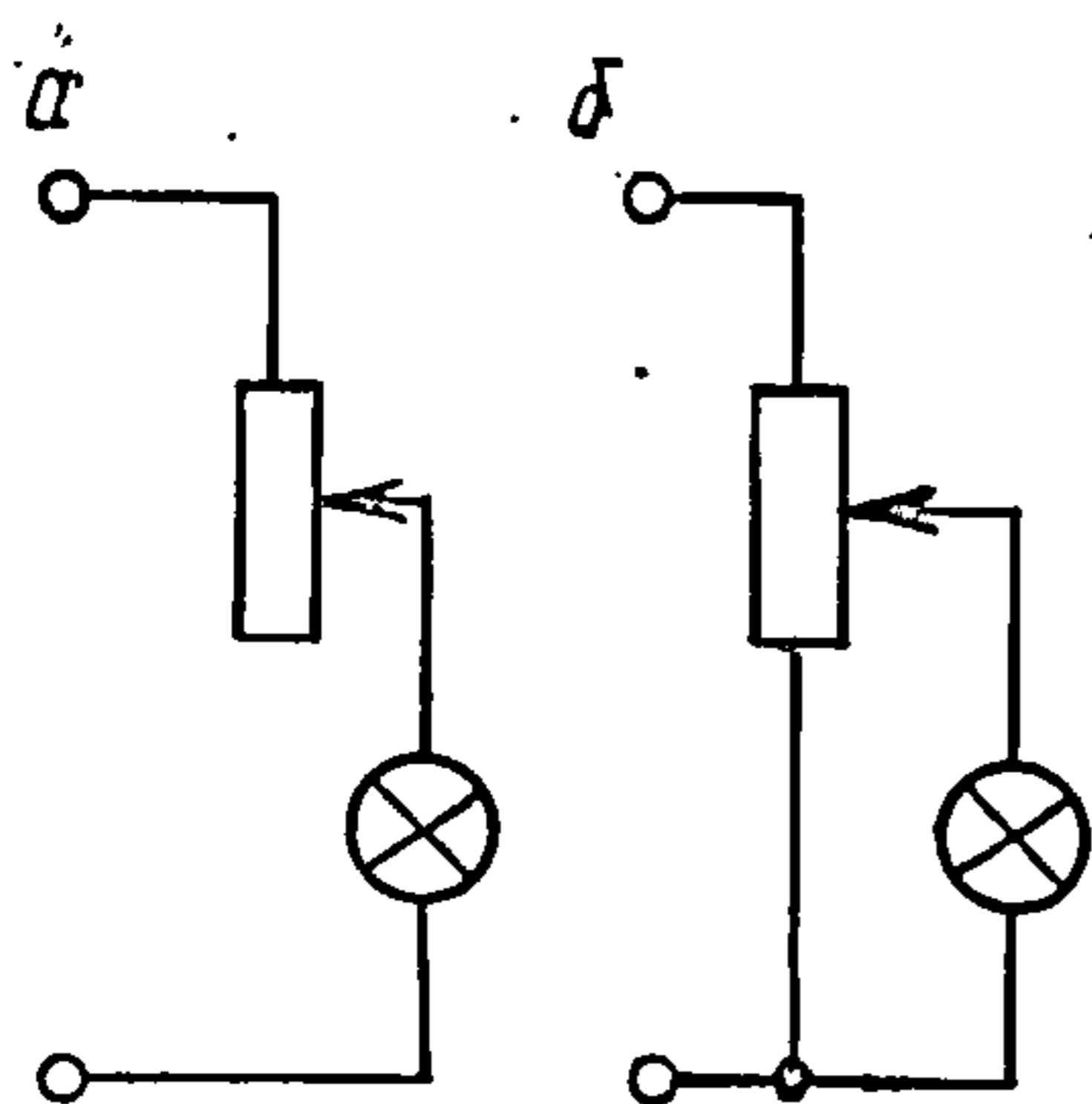
18.47. Калі патэнцыял анода фотаэлемента вышэйшы, чым патэнцыял катода, то сіла току фотаэлемента  $I_0 = 10 \text{ мА}$  (ток насычанаści); у процілеглым выпадку сіла току фотаэлемента роўная 0. Не ўлічваючы унутранае супраціўленне крыніц току, знайсці напружанне на фотаэлементах у схемах, паказаных на рыс. 18.38, калі  $\mathcal{E}_1 = 0,1 \text{ кВ}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 0,2 \text{ кВ}$ ,  $R_1 = 1,0 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 2,0 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 3,0 \text{ кОм}$ ,  $R_4 = 4,0 \text{ кОм}$ .

### Работа і магутнасць току

18.48. Як з чатырох драцяных спіраляў супраціўленнямі 10, 20, 30 і 40 Ом, разлічаных на магутнасць не большую, чым 2 Вт на кожнай, скласці награвальнік найбольшай магчымай магутнасці, калі ёсць крыніца току з ЭРС 20 В і ўнутраным супраціўленнем 20 Ом?

18.49. Для таго каб уключыць лампу ў сетку напружання, большага за тое, на якое разлічана лампа, можна карыстацца схемай, паказанай на рыс. 18.39, а ці на рыс. 18.39, б. У якой з гэтых схем ККДз вышэйшы, калі ў кожным выпадку лампа гарыць у патрэбным рэжыме?

18.50. Лампа, уключаная ў сетку напружаннем  $U_1 = 200 \text{ В}$ , спажывае магутнасць  $P_1 = 40 \text{ Вт}$  і гарыць ярка, прычым тэмпература ніці  $t_1 = 3000^\circ \text{ С}$ . Пры ўключэнні ў сетку напружаннем  $U_2 = 100 \text{ В}$  лампа спажывае магутнасць  $P_2 = 25 \text{ Вт}$  і ледзь-ледзь свеціцца, бо тэмпература ніці пры гэтым роўная  $t_2 = 1000^\circ \text{ С}$ . Знайсці супраціўленне  $R_0$  ніці лампы пры тэмпературы  $t = 0^\circ \text{ С}$ .



Рыс.18.39

18.51. Ток магутнасцю 10 кВт неабходна перадаць па медных правадах на адлегласць 500 м пры напружанні 200 В. Вызначыць неабходнае сячэнне гэтых правадоў, напружанне ў пачатку лініі перадач і магутнасць страт у лініі, калі напружанне спажыўца ніжэй зазначанага на 5 %, а страты напружання ў лініі не павінны перавышаць 10 %.

18.52. Генератар пастаяннага току развівае ЭРС 150 В і дае ў знешні ланцуг сілу току 30 А. Вызначыць: магутнасць генератара; магутнасць страт унутры крыніцы току і спажыўца, а таксама ККДз

крыніцы току, калі яе ўнутранае супраціўленне  $0,6 \text{ Ом}$ .

18.53. На гарызантальна размешчаны вал рухавіка радыусам  $r$  раўнамерна намотваецца нітка з грузам масай  $m$  на канцы. Рухавік далучаны да крыніцы пастаяннага току з ЭРС  $\mathcal{E}$  і сілай току ў ланцугу  $I$  пры поўным супраціўленні ланцуга  $R$ . Колькі абаротаў робіць вал у секунду?

18.54. Халадзільнік магутнасцю  $P$  за час  $t$  ператварыў у лёд  $n$  літраў вады, якая першапачаткова мела тэмпературу  $\theta$ . Якая колькасць цеплыні вылучылася ў пакой за гэты час?

18.55. Тэмпература электрычнага награвальніка, далучанага да крыніцы току, роўная  $t_1$ . Пры ахаладжэнні награвальніка з дапамогай вентылятара яна апускаецца да значэння  $t_2$ . Ці будуць колькасці цяплынь, вылучаных награвальнікам, у абодвух выпадках аднолькавымі?

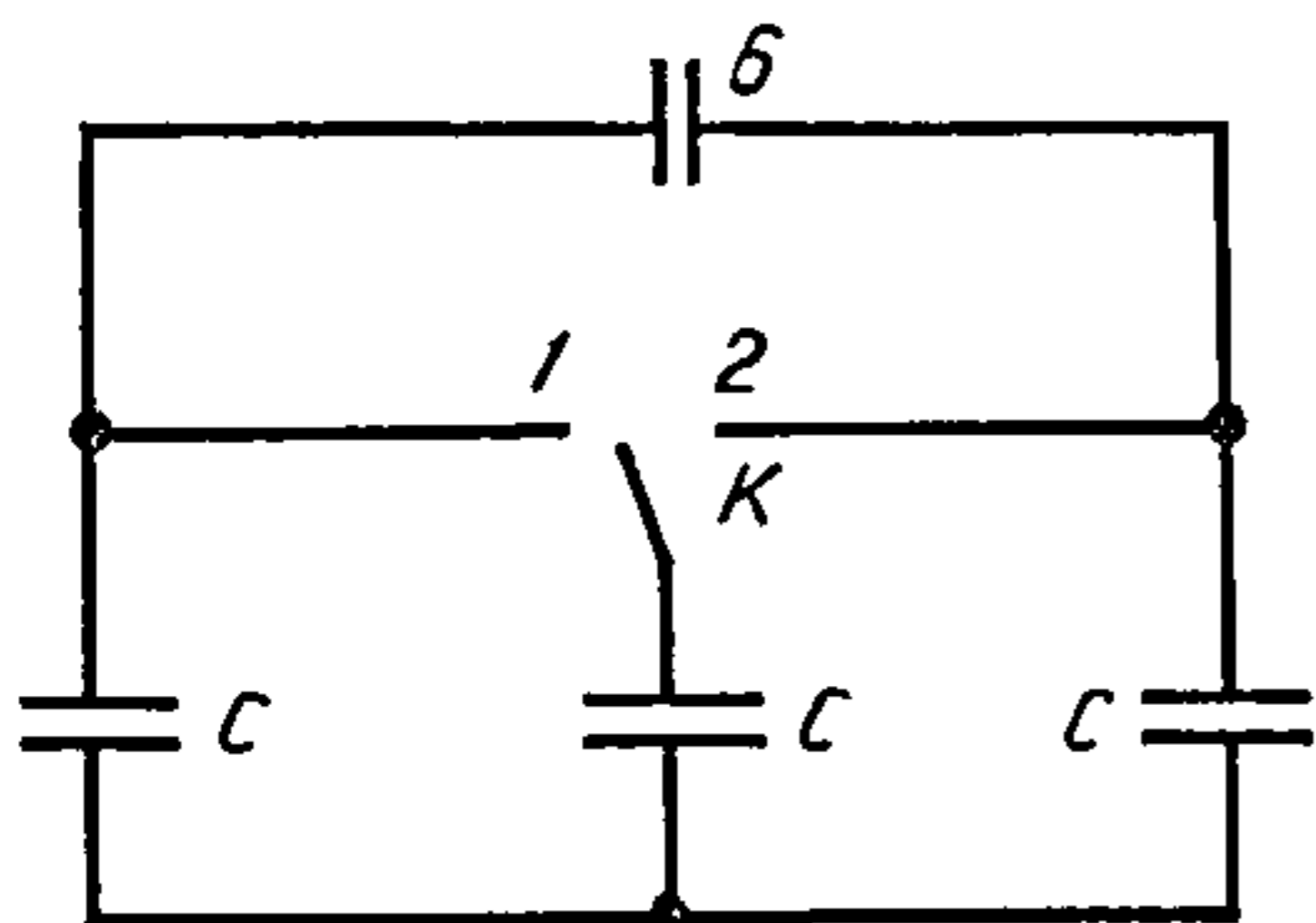
18.56. Электрычны награвальнік, уключаны ў сетку напружаннем  $U = 220 \text{ В}$ , выраблены з канстантанавага дроту, які павінен нагрывацца да  $t_2 = 420^\circ \text{ С}$  пры тэмпературы навакольнага асяроддзя  $t_1 = 20^\circ \text{ С}$ . Вызначыць магутнасць награвальніка, даўжыню  $l$ , дыяметр  $d$  дроту, калі вядома, што шчыльнасць току ў канстантанавым дротце не павінна перавышаць  $J = 15,2 \text{ МА/м}^2$ . Каэфіцыент цеплааддачы прыняць роўным  $k = 64,7 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

18.57. Прымаючы ахаладжэнне напальваемага дроту ў паветры прамапрапарцыянальным рознасці тэмператур дроту і паветра і змяненне супраціўлення яго з паніжэннем тэмпературы нязначным, паказаць, што адноснае падоўжанне дроту, напальваемага токам, прамапрапарцыянальнае квадрату току.

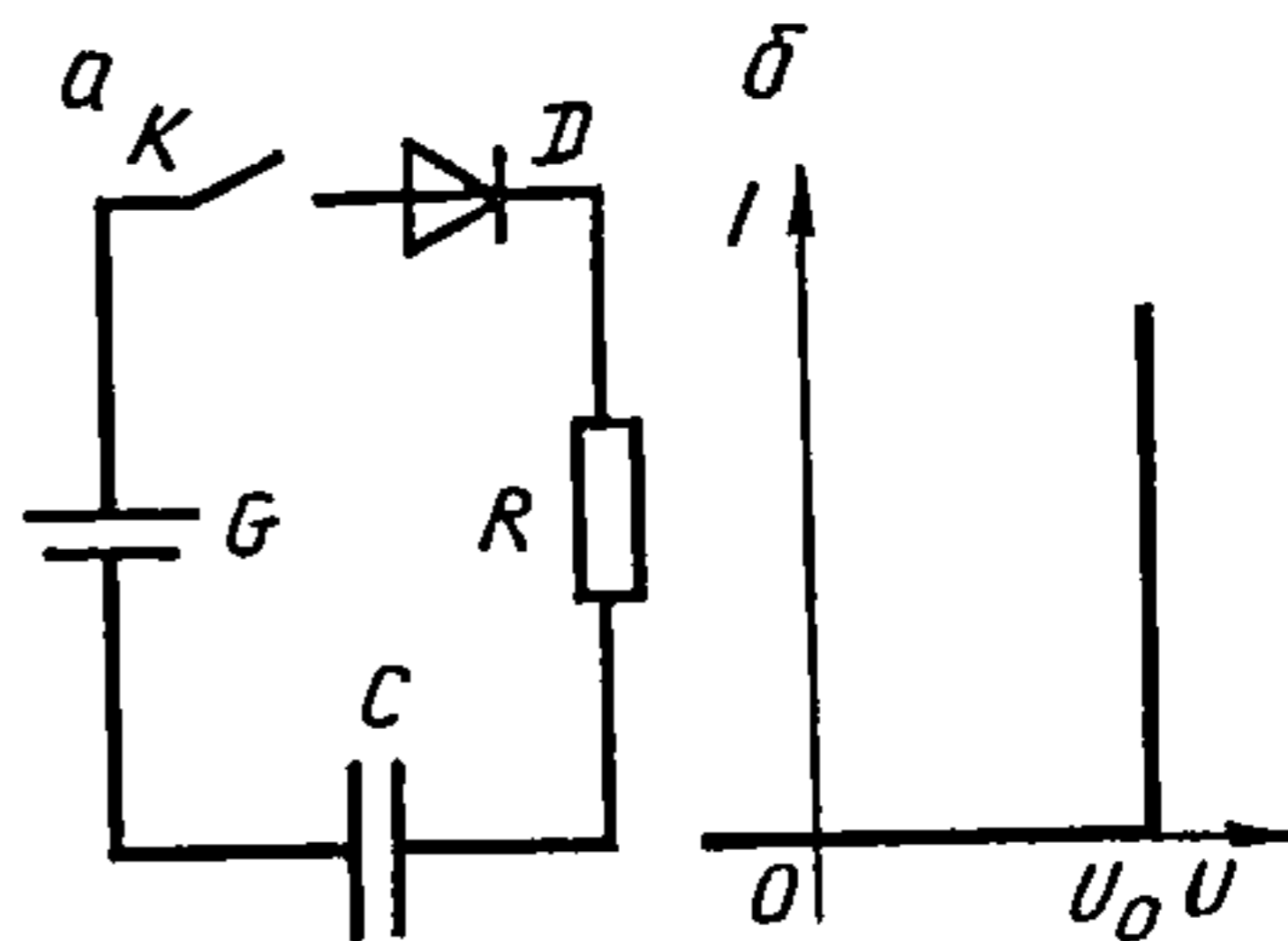
18.58. Маюцца два праваднікі квадратнага сячэння, вырабленыя з аднаго і таго ж матэрыялу. Старана сячэння аднаго дроту  $a_1 = 1 \text{ мм}$ , а другога —  $a_2 = 4 \text{ мм}$ . Для таго, каб расплавіць першы дрот, патрэбна сіла току  $I_1 = 10 \text{ А}$ . Якой павінна быць сіла току  $I_2$ , каб расплавіць другі дрот?

18.59. Якая колькасць цеплыні вылучаецца ў ланцугу (рыс. 18.40) пры пераключэнні ключа  $K$  са становішча 1 ў становішча 2, калі ЭРС крыніцы току  $\mathcal{E}$ , ёмістасць кожнага кандэнсатара  $C$ ?

18.60. Дыёд уключаны ў ланцуг (рыс. 18.41, а). Ідэалізаваная вольт-амперная характарыстыка дыёда, які ўключаны ў ланцуг (рыс. 18.41, а),



Рыс.18.40



Рыс.18.41



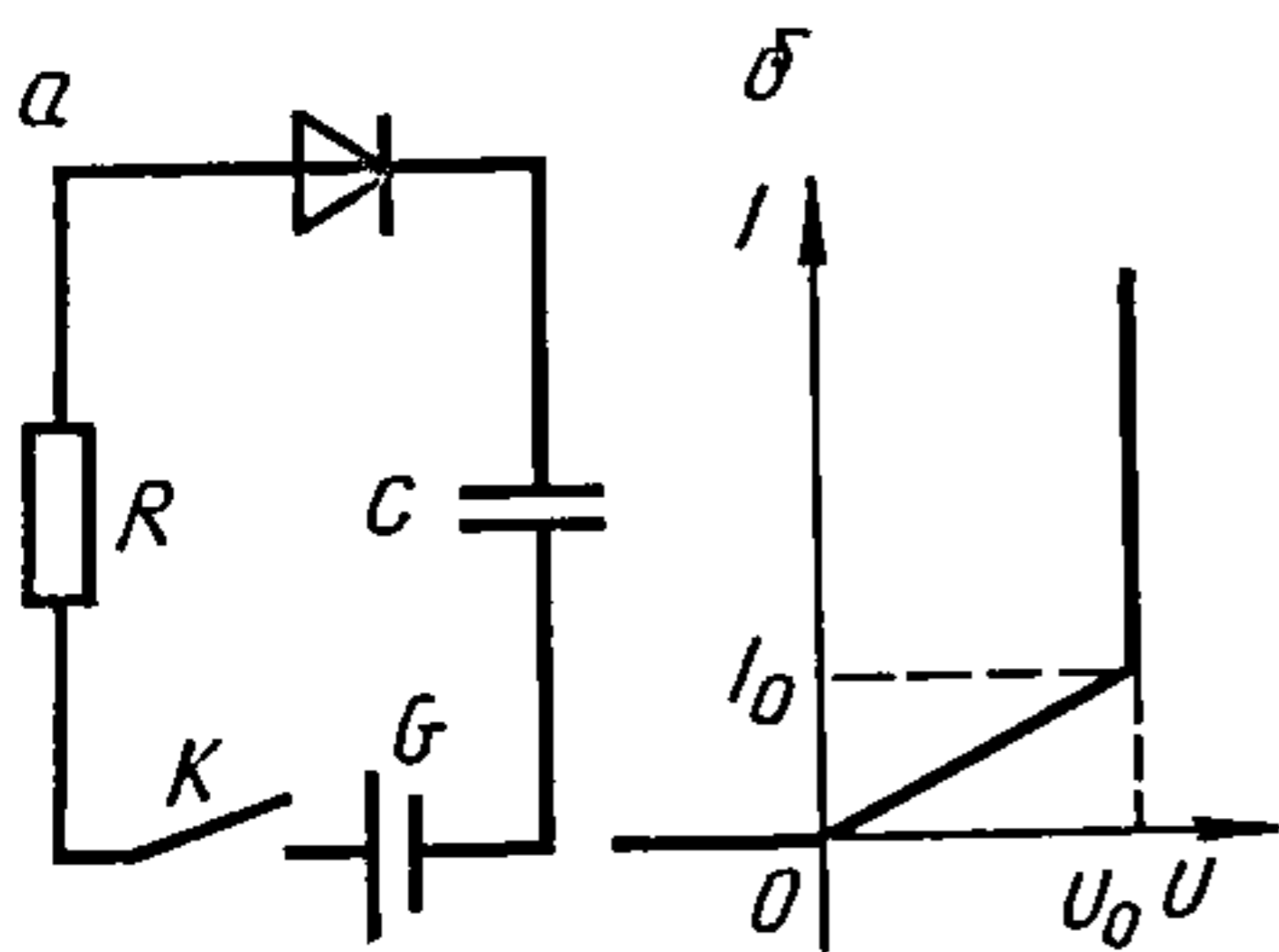


Рис. 18.42

показана на рис. 18.41, б. Конденсатор попередне не заряджаний. Ключ  $K$  замикають. Яка кількість теплоти виділиться на провіднику  $R$  при зарядці конденсатора? Ємність конденсатора  $C$ , ЕРС джерела струму  $\mathcal{E}$ . Унутрішнє опір джерела струму не враховувати.

18.61. Розв'яжіть задачу 18.60 для схеми, показаної на рисунку 18.42, а. Вольт-амперна характеристика джеда показана на рис. 18.42, б.

18.62. Яким повинна бути сячіння свинцю засцерагальніка, калі вядома, што ён плавіцца при павышэнні на  $\Delta t = 10^\circ \text{C}$  тэмпературы праводкі, выкананай з меднага дроту сячэннем  $S = 5 \text{ мм}^2$ ? Пачатковая тэмпература  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . Адачу цеплыні ў навакольнае асяроддзе не ўлічваць.

18.63. У ланцуг, які складзены з меднага дроту плошчай папярочнага сячэння  $S_1 = 3 \text{ мм}^2$ , падключаны свинцовы засцерагальнік плошчай папярочнага сячэння  $S_2 = 1 \text{ мм}^2$ . На якое павелічэнне тэмпературы правадоў пры кароткім замыканні ланцуга разлічаны гэты засцерагальнік? Лічыць, што пры кароткім замыканні з прычыны кароткатэрміновасці працэсу ўся вылучаная цеплыня ідзе на награванне ланцуга. Пачатковая тэмпература засцерагальніка  $t_0 = 17^\circ \text{C}$ .

18.64. Электрычны чайнік мае дзве абмоткі. При ўключэнні адной з іх вада ў чайніку закіпае праз  $t_1 = 15$  мін, при ўключэнні другой — праз  $t_2 = 30$  мін. Праз які час  $t$  закіпіць вада ў чайніку, калі ўключыць дзве абмоткі: 1) паслядоўна; 2) паралельна?

18.65. Награвальны элемент, што выраблены з ніхромавага дроту дыяметрам  $d = 0,15 \text{ мм}$ , разлічаны на напружанне  $U = 220 \text{ В}$  і павінен награватца да  $t_2 = 450^\circ \text{C}$  при тэмпературы навакольнага асяроддзя  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ . Знайдзі сілу току ў награвальніку, даўжыню провада і магутнасць награвальніка, калі каэфіцыент цеплаадачы  $k = 75,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

18.66. Электрычны чайнік умяшчальнасцю  $1,5 \text{ дм}^3$  мае супраціўленне награвальнага элемента  $80 \text{ Ом}$ , ККДз  $80\%$  і працуе при напружанні  $220 \text{ В}$ . Пачатковая тэмпература вады  $20^\circ \text{C}$ . Вызначыць магутнасць току, якую спажывае чайнік, сілу току ў награвальным элеменце, час, на працягу якога вада ў чайніку закіпіць, і кошт энергіі, калі  $1 \text{ кВт} \cdot \text{гадз. каштуе } 40 \text{ к}$ .

18.67. ЭРС крыніцы  $24 \text{ В}$ , супраціўленне знешняга ланцуга  $10 \text{ Ом}$ , падзенне напружання ўнутры крыніцы ЭРС  $4 \text{ В}$ . Вызначыць напружанне на заціскачках крыніцы, сілу току ў ланцугу, унутрашнє супраціўленне крыніцы, магутнасць страт энергіі ўнутры крыніцы і поўную магутнасць.

18.68. З якім ККДз працуе свинцовы акумулятар, ЭРС якога  $\mathcal{E} = 2,15 \text{ В}$ , калі ў знешнім ланцугу супраціўленнем  $R = 0,25 \text{ Ом}$  сіла току  $I = 5 \text{ А}$ ? На

якую максімальную карысную магутнасць разлічаны акумулятар? Як зменіцца пры гэтым яго ККДз?

18.69. Па дадзеных задачы 18.67 пабудаваць графік змянення: 1) сілы току  $I$  ў ланцугу; 2) поўнай магутнасці крыніцы; 3) магутнасці току, перадаваемай у знешні ланцуг; 4) напружання на заціскачках крыніцы; 5) ККДз крыніцы як функцыі пераменнага знешняга супраціўлення, узяўшы наступныя яго значэнні: 0 Ом; 1; 2; 4; 10; 22; 46 Ом.

18.70. Батарэя з ЭРС 50 В і ўнутраным супраціўленнем 5 Ом замыкаецца на знешняе пераменнае супраціўленне, якое дае магчымасць змяняць сілу току ў ланцугу ад 0 да 10 А паслядоўна праз 1 А. Пабудаваць графік залежнасці ад сілы току: 1) магутнасці току, якая аддаецца ў знешні ланцуг; 2) магутнасці, якая расейваецца ўнутры крыніцы; 3) поўнай магутнасці; 4) ККДз крыніцы току.

18.71. Батарэя з ЭРС 40 В і ўнутраным супраціўленнем 5 Ом замыкаецца на знешняе супраціўленне, якое можна мяняць ад 0 да 35 Ом. Пабудаваць графік залежнасці ад знешняга супраціўлення: 1) магутнасці току, якая аддаецца ў знешні ланцуг; 2) магутнасці страт энергіі ўнутры крыніцы; 3) поўнай магутнасці; 4) ККДз крыніцы току.

18.72. Пры якім значэнні супраціўлення знешняга ланцуга тая магутнасць, што аддаецца крыніцай току ў знешні ланцуг, максімальная і якія пры гэтым сіла току і магутнасць?

## § 19. ТЭРМАЭЛЕКТРОННАЯ ЭМІСІЯ І КАНТАКТНЫЯ З'ЯВЫ

Работа выхаду электрона з металу

$$A = e\varphi.$$

Залежнасць шчыльнасці тэрмаэлектроннага току ад напружання на анодзе (насычанасць не мае месца) выражаецца формулай Багуслаўскага—Лангмюра:

$$J = KU^{3/2},$$

дзе  $K$  — пастаянная, што характарызуе памеры і форму электродаў і не залежыць ад тэмпературы катода.

Для плоскіх электродаў

$$K = \frac{\sqrt{2}}{9\pi} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{1}{d^2},$$

дзе  $d$  — адлегласць паміж плоскімі электродамі.

Залежнасць шчыльнасці току насычанасці ад тэмпературы выражаецца формулай Рычардсона—Дэшмана:

$$J_H = BT^2 e^{-A/(kT)},$$

дзе  $B$  — пастаянная:  $B = 602 \text{ кА}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^2)$ ;  $k$  — пастаянная Больцмана;  $T$  — тэрмадынамічная тэмпература катода.

Кантактная рознасць патэнцыялаў:

$$\begin{aligned} \text{знешняя } \Delta\varphi_e &= (A_2 - A_1)/e, \\ \text{унутраная } \Delta\varphi_i &= \frac{1}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \end{aligned}$$



дзе  $n_1$  і  $n_2$  — канцэнтрацыя электронаў праводнасці ў кантактуючых металаў.

У абмежаваным інтэрвале тэмператур тэрмаЭРС  $E$  залежыць ад рознасці тэмператур спаёў для ланцуга з двух розных металаў:

$$E = \alpha (T_2 - T_1),$$

дзе  $\alpha$  — каэфіцыент, які залежыць ад прыроды кантактуючых металаў.

## Тэрмаэлектронная эмісія

19.1. Электрон, які мае скорасць 1,3 Мм/с, стукаецца аб пласціну з цэзія. Ці вырвецца новы электрон з пласцінкі? Калі так, то якой найменшай скорасцю павінен ён валодаць?

19.2. У электроннай лямпе ток насычанасці дасягае значэння  $I_n = 2,86$  мкА пры тэмпературы вальфрамавага валаска катода  $T = 2$  кК. Знайсці дыяметр валаска катода, калі даўжыня яго  $l = 2$  см.

19.3. У колькі разоў зменшыцца ўдзельная тэрмаэлектронная эмісія вальфраму, які мае тэмпературу 2400 К, калі павысіць тэмпературу вальфраму на 100 К?

19.4. На анодзе электроннай лямпы за 1 гадзіну работы вылучылася 63 Дж энергіі пры сіле току ў лямпе 6,3 мА. Знайсці скорасць электронаў катоднага пучка, лічачы, што вылучэнне цеплыні адбываецца толькі за кошт кінетычнай энергіі электронаў.

19.5. Напружанасць поля паміж анодам і катодам тэлевізійнай трубкі, якія знаходзяцца на адлегласці 10 см адзін ад аднаго, роўная 100 кВ/м. Знайсці скорасць і энергію электронаў у момант удару іх аб экран трубкі, калі лічыць поле аднародным.

19.6. Анодны ток электроннай лямпы 10 мА. Колькі электронаў вылятае кожную секунду з катода лямпы?

19.7. Знайсці круцізну характарыстыкі трохэлектроднай лямпы і сярэдняе ўнутранае супраціўленне яе на ўчастку змены аноднага напружання ад 55 да 80 В, якая выклікае змену аноднага току ад 40 да 70 мА, калі каэфіцыент узмацнення роўны 1.

19.8. Трэхэлектродная лямпа мае ўнутранае супраціўленне 3 кОм і круцізну характарыстыкі 3 мА/В. Знайсці каэфіцыент узмацнення гэтай лямпы.

19.9. Унутранае супраціўленне трохэлектроднай лямпы з каэфіцыентам узмацнення 40 роўнае 8 кОм. Знайсці змену аноднага току і круцізну характарыстыкі, калі змена аноднага напружання складае 120 В.

19.10. Вызначыць канцэнтрацыю электронаў у пучку электронна-прамянёвай трубкі асцылографа паблізу экрана. Плошча сячэння пучка  $S = 1,0$  мм<sup>2</sup>, сіла току  $I = 1,6$  мкА. Электроны вылятаюць з катода без пачатковай скорасці і паскараюцца паміж катодам і анодам электрычным полем з рознасцю патэнцыялаў  $U = 28,5$  кВ.



## Кантактныя з'явы

19.11. Які найбольшы зарад можа прайсці па тэрмапары медзь -- плаціна пры паглыннанні гарачым спаём  $Q = 4,19$  Дж энергіі? Тэмпература гарачага спаю  $t_1 = 100^\circ \text{C}$ , халоднага  $t_2 = 0^\circ \text{C}$ , ЭРС  $E = 0,76$  мВ.

19.12. Тэрмапара вісмут — жалеза з тэрмаэлектрычнай пастаяннай  $\alpha = 92$  мкВ/К і супраціўленнем  $R = 5,0$  Ом далучана да гальванометра з унутраным супраціўленнем  $R_r = 110$  Ом. Якую сілу току пакажа гальванометр, калі тэмпература аднаго спаю тэрмапары  $t_1 = 100^\circ \text{C}$ , а другога  $t_2 = 0^\circ \text{C}$ ?

19.13. Для вымярэння тэмпературы асяроддзя ў яго пагружаюць адзін спай тэрмапары нікель—хром з пастаяннай  $\alpha = 0,5$  мкВ/К, якая далучана да гальванометра з унутраным супраціўленнем  $2$  кОм і цаной дзялення  $10$  нА/дзял. Чаму роўна тэмпература асяроддзя, калі пры тэмпературы другога спаю  $15^\circ \text{C}$  адхіленне стрэлкі гальванометра складае  $25$  дзяленняў?

19.14. Вызначыць ЭРС тэрмаэлемента пры рознасці тэмператур спаяў  $500$  К, калі тэрмаэлектрычная пастаянная яго  $50$  мкВ/К.

19.15. Вызначыць супраціўленне гальванометра з цаной дзялення шкалы  $15$  нА/дзял., калі супраціўленне тэрмапары  $6$  Ом і ёю можна вымяраць мінімальнае змяненне тэмпературы  $6$  мК. Тэрмаэлектрычная пастаянная тэрмапары  $50$  мВ/К. Адхіленне стрэлкі гальванометра  $10$  дзяленняў.

19.16. Работа выхаду электронаў з медзі  $4,47$  эВ, а з свінцу  $3,47$  эВ. Якая знешняя кантактная рознасць патэнцыялаў у злучэнні гэтых двух металаў? Лічыць канцэнтрацыі электронаў праводнасці аднолькавымі.

19.17. Вызначыць унутраную кантактную рознасць патэнцыялаў паміж меддзю і каліём пры тэмпературы  $27^\circ \text{C}$ .

19.18. Тэрмапара канстантан—жалеза супраціўленнем  $0,25$  Ом падключаная да гальванометра супраціўленнем  $5,0$  Ом і цаной дзялення шкалы  $0,95$  мкА/дзял., які пры награванні спаю паказвае сілу току  $85,0$  мкА. На колькі нагрэўся спай і на колькі дзяленняў шкалы адхілілася стрэлка, калі пастаянная тэрмапары  $51,60$  мкВ/К?

## § 20. ЭЛЕКТРЫЧНЫ ТОК У ЭЛЕКТРАЛІТАХ І ГАЗАХ

Скорасць устойлівага накіраванага руху іонаў

$$v_{\pm} = b_{\pm} E,$$

дзе  $E$  — напружанасць поля;  $b_{\pm}$  — рухомасць іонаў. Закон Ома:

для электралітаў

$$J = n_0 Q \alpha (b_+ + b_-) E,$$

дзе  $n_0$  — лік малекул растваранага рэчыва ў электраліце аб'ёмам  $1$  см<sup>3</sup>;  $\alpha$  — каэфіцыент дысацыяцыі;

для газаў пры невялікіх шчыльнасцях току

$$J = Q n_0 (b_+ + b_-) E,$$

дзе  $n_0$  — лік пар іонаў, якія знаходзяцца ў адзінцы аб'ёму газу (насычанасць не мае месца).

Шчыльнасць току насычэння паміж плоскімі электродамі, якія знаходзяцца на адлегласці  $d$  адзін ад аднаго:

$$J = Ned.$$

Першы закон Фарадэя:

$$m = kIt,$$

дзе  $k$  — электрахімічны эквівалент рэчыва;  $I$  — сіла току.

Другі закон Фарадэя:

$$k = \frac{1}{F} x,$$

дзе  $x = A/Z$  — хімічны эквівалент;  $A$  — атамная маса рэчыва;  $Z$  — валентнасць;  $F$  — пастаянная Фарадэя.

## Электрычны ток у электралітах

20.1. Вызначыць масу медзі, якая выдзелілася на электродах купарвасу ( $\text{CuSO}_4$ ) на працягу 2 гадз. пры сіле току 10 А.

20.2. Пры разрадзе элемента разрадным токам 0,2 А быў выкарыстаны цынк масай 5,0 мг. Знайсці час работы элемента.

20.3. Пры сіле праходзячага праз раствор току 1 А на катодзе выдзелілася 8,05 г рэчыва. Вызначыць электрахімічны эквівалент рэчыва, калі ток праз раствор працякаў на працягу 2 гадз.

20.4. Які зарад прайшоў праз раствор сернакіслага серабра ( $\text{Ag}_2\text{SO}_4$ ), калі на катодзе выдзелілася чыстае серабро масай 16,77 г?

20.5. Ток шчыльнасцю 5 мА/см<sup>2</sup> працякае праз электралітычны раствор сернакіслага нікелю ( $\text{NiSO}_4$ ). За які час адкладзецца слой таўшчынёй 50 мкм і якая магутнасць патрэбна для таго, каб на працягу 1 гадз. пакрыць нікелем паверхню 1 мм<sup>2</sup> да ўказанай таўшчыні, калі напружанне 7 В?

20.6. Для гальванічнага пакрыцця золатам выкарыстоўваюць раствор хларыстага золата ( $\text{AuCl}_3$ ). Праз які час можна атрымаць слой золата таўшчынёй 5 мкм, калі шчыльнасць току 0,2 А/дм<sup>2</sup>?

20.7. Які зарад трэба прапусціць праз электралітычную ванну, напоўненую падкисленай вадой, каб пры нармальных умовах запоўніць вадародам шар-зонд дыяметрам  $d = 10$  м?

20.8. Пры электролізе вады праз ванну на працягу часу  $t = 25$  мін сіла току была  $I = 20$  А. Якая тэмпература кіслароду, што выдзеліўся, калі ён ў аб'ёме  $V = 1$  л знаходзіцца пад ціскам  $p = 0,2$  МПа? Электрахімічны эквівалент кіслароду  $8,29 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл.

20.9. Ведаючы атамныя масы элементаў, вызначыць электрахімічныя эквіваленты серабра, медзі, алюмінію і нікелю.

20.10. Пры сіле току 2,2 А за 1 гадз. 12 мін у электраліце, які ўтрымлівае медзь, на катодзе выдзелілася медзь масай 1,65 г. Вызначыць ККДз устаноўкі.



20.11. Тры ванны з растворамі  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{NiSO}_4$  злучаны паслядоўна. За час праходжання току ў першай ванне выдзелілася медзь масай 10 г. Колькі нікелю і серабра выдзелілася ў другой і трэцяй ваннах адпаведна?

20.12. У ланцуг электрычнай ванны з растворам меднага купарвасу ўключаны амперметр, які паказвае сілу току 5 А. На катодзе за 25 мін выдзелілася медзь масай 2,1 г. Ці правільна паказвае амперметр?

20.13. Якое назапашванне зараду ў акумулятары, што ўтрымлівае перакіс свінцу ( $\text{PbO}_2$ ) масай 20 г?

20.14. На падставе законаў электролізу вызначыць масу вадароднага іона і зарад электрона.

20.15. Праз шкляную трубку сячэннем  $83,4 \text{ мм}^2$ , запоўненую растворам кухоннай солі ( $\text{NaCl}$ ), праходзіць ток 2,7 А. Вызначыць, колькі пар іонаў утвараецца за 1 с у аб'ёме  $1 \text{ см}^3$ , калі пад уздзеяннем электрычнага поля іоны хлору рухаюцца ў раствору са скорасцю  $1015 \text{ мкм/с}$ , а іоны натрыю — са скорасцю  $675 \text{ мкм/с}$ .

20.16. Вызначыць канцэнтрацыю іонаў натрыю ў водным раствору кухоннай солі малой канцэнтрацыі, калі сіла току ў плоскіх электродах, размешчаных на адлегласці  $d = 10,0 \text{ см}$ , роўная  $I = 1,8 \text{ А}$ . Напружанне паміж электродамі  $U_0 = 20,0 \text{ В}$ , а рухомасць іонаў:  $b_{\text{Na}^+} = 0,45 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$ ;  $b_{\text{Cl}^-} = 0,68 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/(\text{с}\cdot\text{В})$ . Плошча пласцін  $S = 10^3 \text{ см}^2$ .

20.17. Для таго каб пакрыць слоём серабра паверхню плошчай  $S = 500 \text{ см}^2$ , спатрэбілася прапусіць ток  $I = 2 \text{ А}$  на працягу  $t = 5$  гадзін праз раствор солі серабра. Знайсці таўшчыню слоя серабра.

20.18. Элемент з ЭРС  $\mathcal{E} = 1,5 \text{ В}$  і ўнутраным супраціўленнем  $r = 0,5 \text{ Ом}$  замкнуты на нагрузку супраціўленнем  $R = 3,0 \text{ Ом}$ . Знайсці час работы элемента, на працягу якога выкарыстана  $m = 5,0 \text{ г}$  цынку.

20.19. Каэфіцыент дысацыяцыі раствору азотнакіслага серабра ( $\text{AgNO}_3$ ) з канцэнтрацыяй  $n = 30 \text{ кг/м}^3$  роўны  $\alpha = 45 \%$ . Знайсці ўдзельную электраправоднасць гэтага раствору пры  $t = 18^\circ \text{ С}$ :

20.20. Колькі электраэнергіі выкарыстоўваецца на атрыманне алюмінію масай 1 кг, калі электроліз вядзецца пры напружанні 10 В, а ККДз усёй устаноўкі 80 %? Атамная маса алюмінію 27.

20.21. Знайсці каэфіцыент дысацыяцыі раствору хларыстага серабра ( $\text{AgCl}$ ), калі ўдзельнае супраціўленне яго  $\rho = 0,25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  пры канцэнтрацыі  $n = 120 \text{ кг/м}^3$  і тэмпературы  $t = 18^\circ \text{ С}$ .

20.22. Каэфіцыент дысацыяцыі воднага раствору хларыстага калію ( $\text{KCl}$ ) 77,5 %. Знайсці канцэнтрацыю раствору, калі ўдзельнае супраціўленне яго  $74 \text{ мОм}\cdot\text{м}$ .

#### Электрычны ток у газах

20.23. Якой адноснай скорасцю павінны валодаць малекулы неону, каб пры ўзаемасутыкненні адбылася аднаразавая іанізацыя адной з іх?



20.24. Паветра, заключанае паміж пласцінамі плоскага кандэнсатара, іанізуецца знешнім іанізатарам. Знайсці скорасць іонаў у полі кандэнсатара ёмістасцю 50 пФ і плошчай пласцін  $250 \text{ см}^2$  кожная пры напружанні 400 В паміж імі.

20.25. Знайсці канцэнтрацыю іонаў паміж пласцінамі плоскага кандэнсатара ёмістасцю 6,6 пФ, калі паветра іанізуецца знешнім іанізатарам і пры напружанні 450,0 В сіла току 7,0 мкА. Насычанасць не мае месца.

20.26. Аргон, які знаходзіцца паміж пласцінамі кандэнсатара плошчай  $300 \text{ см}^2$  кожная з адлегласцю паміж імі 5 см, іанізуецца знешнім іанізатарам. Знайсці лік пар іонаў, якія ўтвараюцца за 1 с у аргоне аб'ёмам  $1 \text{ см}^3$ , калі сіла току насычанасці паміж пласцінамі 4 пА.

20.27. Якую скорасць павінен мець электрон, каб пры сутыкненні іанізаваць атам аргона?

20.28. Паміж пласцінамі плоскага кандэнсатара, якія знаходзяцца на адлегласці 5,0 см адна ад другой, за 1 с у паветры аб'ёмам  $1 \text{ см}^3$ , пад дзеяннем знешняга іанізатара ўтвараецца  $6,6 \cdot 10^6$  пар іонаў. Знайсці плошчу пласціны кандэнсатара, калі сіла току насычанасці 3,0 пА.

20.29. Знайсці лік пар іонаў, якія ўтвараюцца ў атмасферы аб'ёмам  $1 \text{ см}^3$  пры нармальным умовах за 1 с паміж пласцінамі плоскага кандэнсатара плошчай  $250 \text{ см}^2$  кожная, калі пры адлегласці паміж пласцінамі 5 см сіла току насычанасці 1 фА.

20.30. Згодна з доследнымі дадзенымі, іскравы разрад у паветры пры нармальным умовах наступае пры напружанасці поля 30 кВ/см. Знайсці даўжыню свабоднага прабегу электрона, які валодае энергіяй 15 аДж пры дадзеных умовах.

20.31. Пры якой рознасці патэнцыялаў паміж электродамі загараецца неонавая лампа, калі энергія іанізацыі неона  $A = 21,5 \text{ эВ}$ , а сярэдняя адлегласць паміж двума паслядоўнымі сутыкненнямі электрона з атамамі газу роўная 0,4 нм? Электроды маюць выгляд вялікіх пласцін, размешчаных на адлегласці  $d = 3,0 \text{ мм}$  адна ад другой.

20.32. Рознасць патэнцыялаў паміж воблакам і Зямлёй у момант разраду (маланкі) дасягае 10 МВ, а зарад, што працёк, роўны 30 Кл. Знайсці энергію разраду і напружанасць поля, калі вышыня воблака 4 км.

20.33. Электрон праходзіць шлях 10 см у полі напружанасцю 10 МВ/м. Колькі атамаў кіслароду можа іанізаваць ён на сваім шляху?

## § 21. МАГНІТНАЕ ПОЛЕ. ДЗЕЯННЕ МАГНІТНАГА ПОЛЯ НА ЗАРАДЫ І ТОКІ, ЯКІЯ РУХАЮЦЦА

Індукцыя магнітнага поля, ствараемага элементам правадніка даўжынёй  $dl$ , па якім цячэ ток  $I$  (закон Біо—Савара—Лапласа):

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

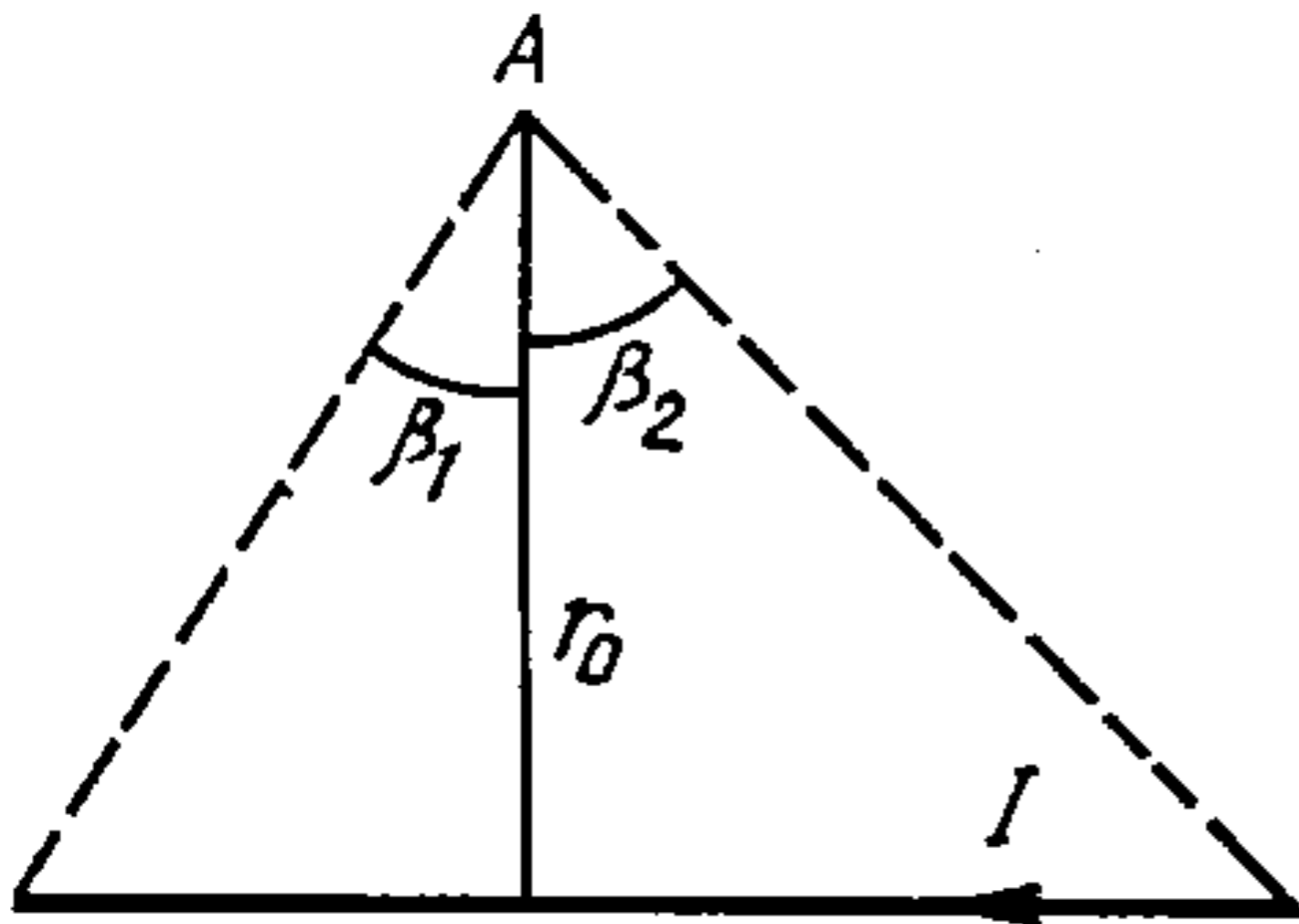
дзе  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнітная пастаянная;  $d\vec{l}$  — вектар, роўны даўжыні  $dl$  элемента правадніка і накіраваны ў той бок, куды цячэ ток;  $\vec{r}$  — радыус-вектар, праведзены ад элемента правадніка ў пункт, у якім вызначаецца індукцыя  $d\vec{B}$ ;  $r$  — модуль гэтага вектара.

Модуль індукцыі  $\vec{B}$  магнітнага поля, ствараемага бязмежна доўгім прамалінейным правадніком на адлегласці  $R$ :

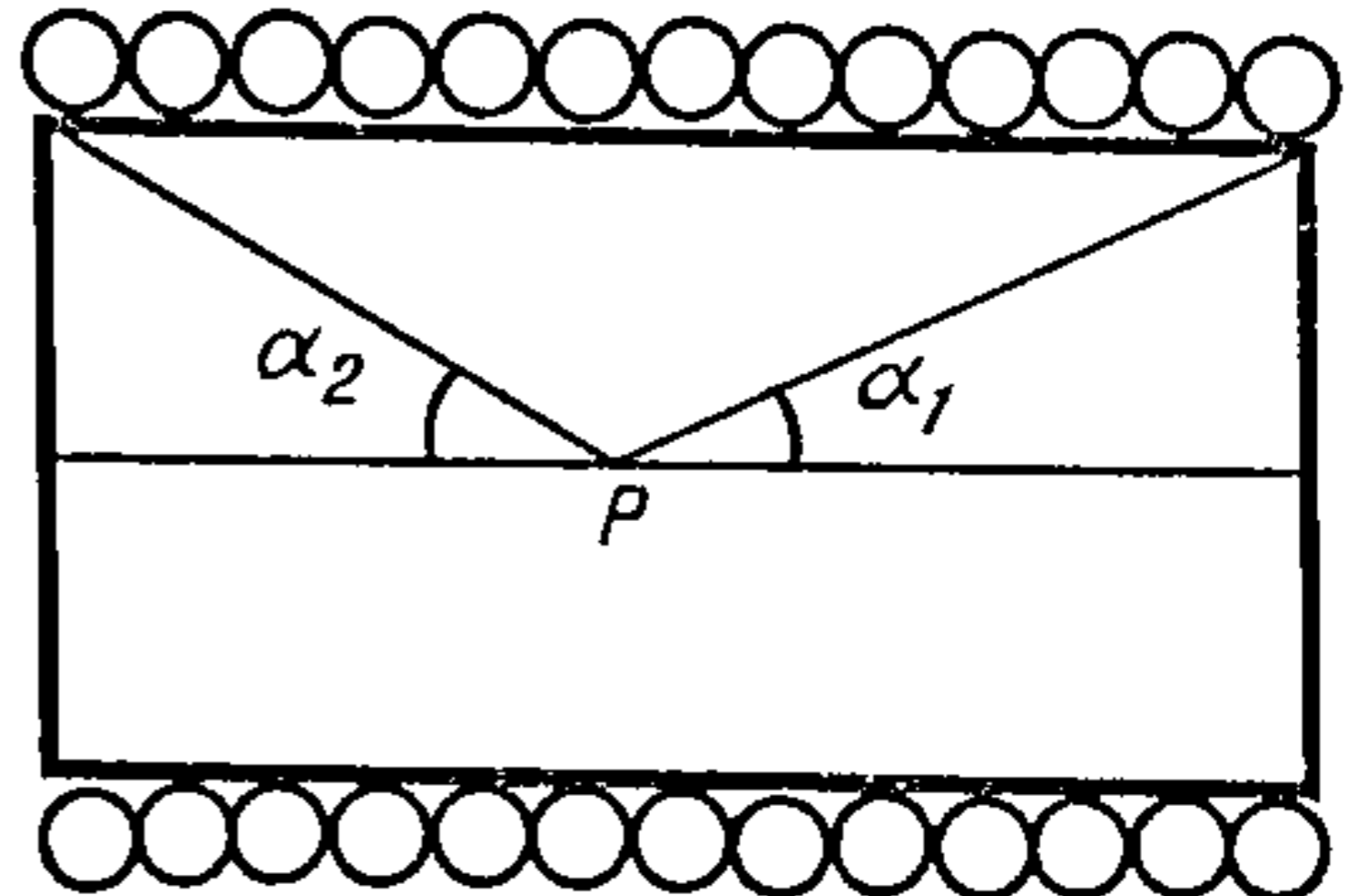
$$B = \mu_0 I / (2\pi R).$$

У выпадку правадніка канечнай даўжыні модуль індукцыі магнітнага поля ў пункце  $A$  (рыс. 21.1) вызначаецца па формуле:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\sin\beta_1 + \sin\beta_2).$$



Рыс.21.1



Рыс.21.2

Модуль індукцыі магнітнага поля на восі кругавога току радыусам  $R$  на адлегласці  $d$  ад плоскасці контуру:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}.$$

Модуль індукцыі магнітнага поля на восі саленоіда ў пункце  $P$  (рыс. 21.2):

$$B = \frac{\mu_0}{2} n I (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2),$$

дзе  $n$  — лік віткаў, што прыходзяцца на адзінку даўжыні саленоіда.

Поле ўнутры доўгага тонкага саленоіда:

$$B = \mu_0 n I.$$

Цыркуляцыя індукцыі магнітнага поля ўздоўж замкнутага контуру ў вакууме роўная алгебраічнай суме токаў, ахопленых гэтым контурам, памножанай на  $\mu_0$ :

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum I_k.$$

Індукцыя магнітнага поля, створанага зарадам  $Q$ , які рухаецца,

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q}{r^3} [\vec{v}, \vec{r}],$$

дзе  $\vec{v}$  — скорасць зараду;  $\vec{r}$  — радыус-вектар, праведзены ад зараду да пункту, у якім вызначаецца індукцыя  $B$ .

У выпадку аднароднага ізатропнага асяроддзя магнітнага індукцыя звязана з напружанасцю магнітнага поля суадносінай

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

дзе  $\mu$  — магнітная пранікальнасць асяроддзя.

Магнітны момант замкнутага плоскага контуру, па якім цячэ ток  $I$ ,

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

дзе  $S$  — плошча контуру;  $\vec{n}$  — адзінкавы вектар нармалі да плоскасці контуру, накіраваны так, што пры назіранні з яго канца здаецца, што ток у контуры цячэ супраць стрэлкі гадзінніка.

Магнітны паток, які пранізвае элементарную пляцоўку  $dS$ ,

$$d\Phi = B \cos \alpha dS,$$

дзе  $\alpha$  — вугал паміж нармаллю  $\vec{n}$  да пляцоўкі і вектарам  $\vec{B}$ .

Магнітны паток у сардэчніку таройда з паветраным зазорам

$$\Phi = \frac{NI}{l/(\mu_0 \mu S) + l_0/(\mu_0 S)},$$

дзе  $N$  — лік віткоў таройда,  $I$  — сіла току;  $l$ ,  $l_0$  — даўжыні сардэчніка і зазору ўздоўж восевай лініі;  $\mu$  — магнітная пранікальнасць сардэчніка;  $S$  — плошча яго сячэння.

На элемент  $d\vec{l}$  правадніка з токам  $I$ , што знаходзіцца ў магнітным полі індукцыяй  $\vec{B}$ , дзейнічае сіла (закон Ампера)

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}],$$

На зарад  $Q$ , што рухаецца са скорасцю  $\vec{v}$  у магнітным полі індукцыяй  $\vec{B}$ , дзейнічае сіла Лорэнца

$$\vec{F} = Q [\vec{v}, \vec{B}].$$

Пры змяшчэнні пласцінкі з сілай току  $I$  у аднароднае магнітнае поле індукцыяй  $\vec{B}$ , якое накіравана перпендыкулярна плоскасці пласцінкі, узнікае папярэчная рознасць патэнцыялаў

$$\Delta\varphi = R \frac{IB}{d},$$

дзе  $R = 1/(ne)$  — пастаянная Хола;  $n$  — канцэнтрацыя носьбітаў зараду;  $e$  — элементарны зарад;  $d$  — таўшчыня пласцінкі.

Сіла ўзаемадзеяння ў вакууме двух доўгіх паралельных прамалінейных праваднікоў з сіламі токаў  $I_1$  і  $I_2$ , аднесеная да адзінкі даўжыні праваднікоў:

$$f = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d},$$

дзе  $d$  — адлегласць паміж праваднікамі.

Перыяд ваганняў стрэлкі (або контура з токам), якая мае магнітны момант  $p_m$  і знаходзіцца ў магнітным полі індукцыяй  $\vec{B}$ , вызначаецца формулай

$$T = 2\pi \sqrt{I / (p_m B)},$$

дзе  $I$  — момант інерцыі стрэлкі (або контура) адносна пункта падвесу.

Сіла, якая дзейнічае на магнітны дыполь;

$$\vec{F} = p_m \frac{\partial \vec{B}}{\partial n},$$

дзе  $\partial \vec{B} / \partial n$  — вытворная вектара  $\vec{B}$  па напрамку дыполя.

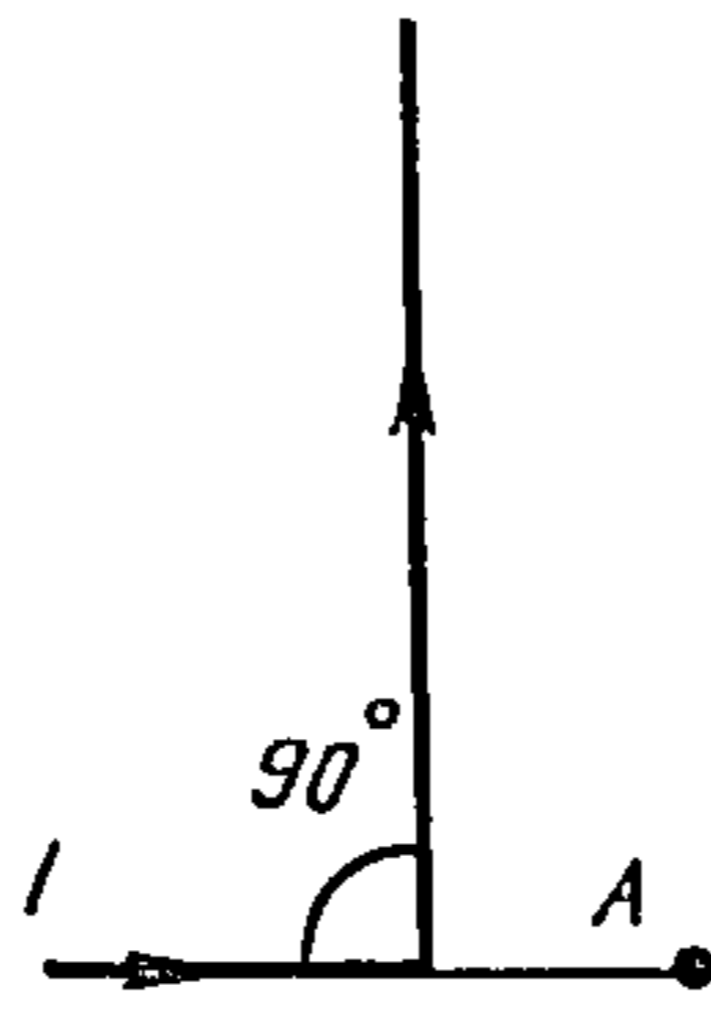
Механічны момант  $\vec{M}$ , што дзейнічае на контур з токам (або на сталы магніт) у аднародным знешнім полі,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

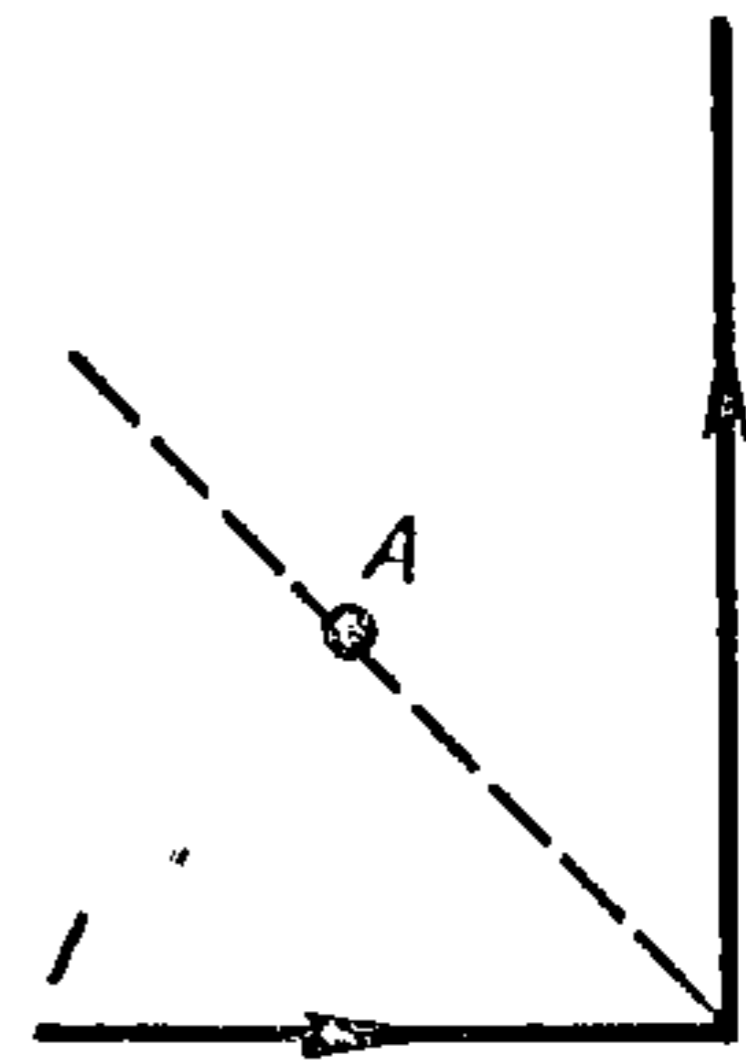




Рыс.21.3



Рыс.21.4



Рыс.21.5

**21.1.** Па двух паралельных бясконца доўгіх правадніках, што знаходзяцца на адлегласці  $d = 10$  см адзін ад аднаго, цякуць токі процілеглых напрамкаў  $I = 30$  А. Вызначыць магнітную індукцыю поля ў пунктах, размешчаных пасярэдзіне праваднікоў. Чаму роўная магнітная індукцыя поля у пункце, які знаходзіцца на адлегласці  $r_1 = 15$  см ад аднаго і  $r_2 = 50$  см ад другога правадніка?

**21.2.** Знайсці сілу току ў бясконца доўгім правадніку, які мае квадратны выгіб са старонай квадрата  $a = 40$  см (рыс. 21.3), калі модуль магнітнай індукцыі поля у пункце  $A$ , размешчаным у цэнтры квадрата,  $B = 63$  мкТл.

**21.3.** Вызначыць магнітную індукцыю поля ў цэнтры квадрата са старонай  $a = 10$  см, па якім цячэ ток  $I = 20$  А.

**21.4.** Вызначыць магнітную індукцыю поля у пункце  $A$  (рыс. 21.4), што знаходзіцца на прадаўжэнні адной са старон прамога вугла, утворанага бясконца доўгім правадніком, па якім цячэ ток  $I = 15$  А, на адлегласці  $a = 10$  см ад вяршыні вугла.

**21.5.** Ток  $I = 10$  А цячэ па бясконца доўгім правадніку, сагнутым пад вуглом  $\alpha = 90^\circ$ . Знайсці магнітную індукцыю поля ў пункце  $A$ , які ляжыць на бісектрысе вугла на адлегласці  $a = 0,20$  м ад вяршыні (рыс. 21.5).

**21.6.** Чаму роўная сіла тока, які праходзіць па перыметру правільнага шасцівугольніка са старонай  $a = 20$  см, калі ў яго цэнтры магнітная індукцыя  $B = 10$  мкТл?

**21.7.** Два прамалінейныя праваднікі з сіламі токаў  $I_1 = 3,0$  А і  $I_2 = 4,0$  А размешчаны адзін гарызантальна, а другі вертыкальна. Найменшая адлегласць паміж імі  $d = 0,10$  м. Вызначыць модуль магнітнай індукцыі ў пункце, які знаходзіцца пасярод гэтай адлегласці.

**21.8.** У двух бясконца доўгіх паралельных правадніках сілы току роўныя  $I = 2,5$  А. Токі маюць аднолькавы напрамак. Вылічыць магнітную індукцыю поля ў пункце, які размешчаны на адлегласці 40 см ад аднаго правадніка і 30 см ад другога, калі адлегласць паміж імі 50 см.

**21.9.** Вызначыць сілу току ў катушцы радыусам 30 см, якая змяшчае 600 віткоў, калі ў цэнтры шпулі магнітная індукцыя роўная 7,5 мТл. Лічыць, што даўжыня катушкі значна меншая за яе радыус.

**21.10.** Прамы бясконцы праваднік мае круглую пятлю радыусам  $R = 80$

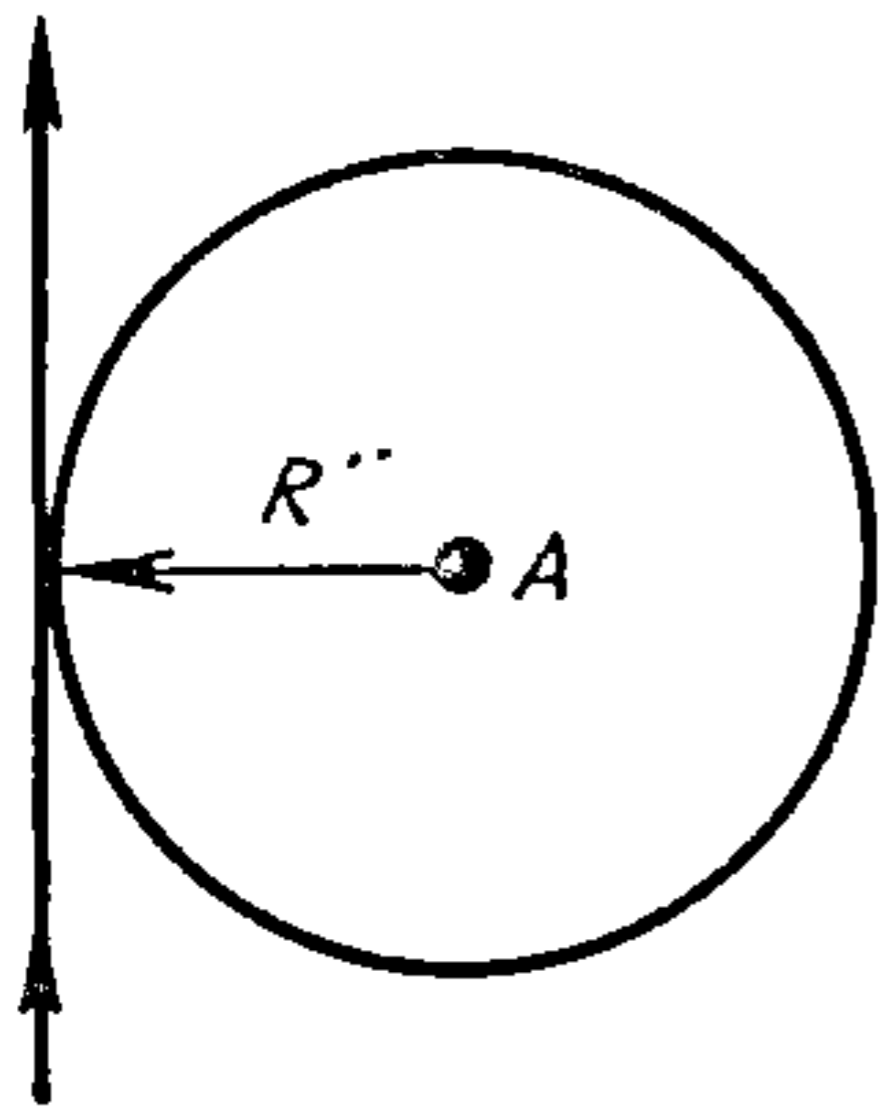


Рис.21.6

см (рис. 21.6). Визначыць сілу току ў правадніку, калі вядома, што ў пункце  $A$  магнітная індукцыя  $B = 12,5$  мкТл.

21.11. Чаму роўная магнітная індукцыя поля на восі вітка ў пункце, размешчаным на адлегласці  $d = 40$  см ад цэнтра, калі ў цэнтры вітка, радыус якога  $R = 30$  см, індукцыя  $B_0 = 25$  мкТл?

21.12. Знайсці магнітную індукцыю поля ў цэнтры саленоіда даўжынёй  $l = 20$  см і дыяметрам  $d = 4,0$  см, калі сіла току ў абмотцы саленоіда  $I = 2,0$  А, а колькасць віткаў  $N = 400$ .

21.13. Визначыць сілу току ў вертыкальна размешчанай катушцы, якая ўтрымлівае  $n = 8$  віткаў дроту радыусам  $R = 20$  см, калі змешчаная у яе цэнтры на вастры магнітная стрэлка адхілілася на вугал  $\alpha = 45^\circ$ . Плоскасць віткаў катушкі супадае з плоскасцю магнітнага мерыдыяна. Гарызантальная складаючая магнітнай індукцыі поля Зямлі  $B_0 = 20$  мкТл.

21.14. Кандэнсатар ёмістасцю  $C = 8$  мкФ з дапамогай спецыяльнага пераключальніка перыядычна зараджаецца ад батарэі, ЭРС якой  $\mathcal{E} = 100$  В, і разраджаецца праз катушку. Колькі разоў за  $t = 1,0$  с пераключаецца кандэнсатар, калі магнітная стрэлка, змешчаная ў цэнтры катушкі, адхілілася на вугал  $\alpha = 45^\circ$ ? Катушка мае  $N = 50$  віткаў радыусам  $R = 12,5$  см і размешчана вертыкальна ў плоскасці магнітнага мерыдыяна. Гарызантальная складаючая магнітнай індукцыі поля Зямлі  $B_0 = 20$  мкТл.

21.15. Визначыць магнітную індукцыю ў цэнтры шара радыусам  $R$ , раўнамерна пакрытага вялікай колькасцю  $N$  паралельных віткаў тонкага дроту, па якім ідзе ток  $I$ .

21.16. Сфера радыусам  $R$ , зараджаная з паверхневай шчыльнасцю  $\sigma$ , верціцца вакол свайго дыяметра з вуглавой скорасцю  $\omega$ . Знайсці магнітную індукцыю ў цэнтры сферы.

21.17. Визначыць магнітны момант кругавога вітка з токам, калі вядома, што на яго восі на адлегласці  $d = 4,0$  см ад цэнтра індукцыя магнітнага поля  $B = 125$  мкТл. Радыус вітка  $R = 3,0$  см.

21.18. Саленоід даўжынёй  $l = 10$  см і дыяметрам  $d = 4,0$  см мае  $n = 20$  віткаў на кожным сантыметры даўжыні. Визначыць магнітны момант саленоіда, калі сіла току ў ім  $I = 2,0$  А.

21.19. У доўгім прамалінейным аднародным правадніку радыусам  $R = 1,0$  см сіла току  $I = 50$  А. Визначыць магнітную індукцыю поля ўнутры правадніка на адлегласці  $r_1 = 0,80$  см ад цэнтра. Чаму роўная магнітная індукцыя поля па-за правадніком на адлегласці  $r_2 = 5,0$  см ад яго цэнтра?

21.20. У тонкай трубе радыусам  $R = 5,0$  см сіла току  $100$  А. Визначыць магнітную індукцыю поля ў цэнтры трубы і па-за трубай на адлегласці  $r = 5,0$  см ад яе паверхні.



21.21. У танкаспеннай доўгай трубе сіла току  $I = 5$  А. Па восі трубы размешчаны тонкі праваднік, па якім цячэ такі ж ток у адваротным напрамку. Вызначыць індукцыю магнітнага поля ў пунктах, размешчаных унутры трубы на адлегласці  $r_1 = 2$  см і па-за трубой на адлегласці  $r_2 = 12$  см ад восі трубы.

21.22. Вызначыць скорасць раўнамернага прамалінейнага руху электрона, калі вядома, што максімальная індукцыя створанага ім магнітнага поля на адлегласці  $r = 100$  нм ад траекторыі  $B = 0,25$  мкТл.

21.23. Знайсці максімальную магнітную індукцыю поля, створанага электронам, які прайшоў паскараючую рознасць патэнцыялаў  $U = 10$  В і рухаецца прамалінейна, у пункце на адлегласці  $r = 10$  нм ад яго траекторыі.

21.24. Прымаючы арбіту электрона ў няўзбуджаным атаме вадароду за акружнасць радыусам  $R = 53$  пм, вызначыць магнітную індукцыю поля, створанага ў цэнтры арбіты.

21.25. Тонкі эбанітавы дыск радыусам  $R = 20$  см раўнамерна зараджаны электрычным зарадам з паверхневай шчыльнасцю  $\sigma = 1$  Кл/м<sup>2</sup>. Дыск верціцца ў паветры вакол перпендыкулярнай восі, што праходзіць праз яго цэнтр, з вуглавой частатой  $\omega = 10$  рад/с. Вызначыць максімальную індукцыю ў цэнтры дыска.

21.26. У саленоідзе, намотаным на стальны сардэчнік даўжынёй 20 см і сячэннем 2,0 см<sup>2</sup>, сіла току 1,0 А. Вызначыць магнітны паток у сардэчніку і магнітную пранікальнасць, калі саленоід мае 400 віткаў. Суадносіну паміж  $B$  і  $H$  для сталі ўзяць з графіка  $B = f(H)$ .

21.27. На чыгунным коле сячэннем 4,0 см<sup>2</sup> намотаны провад у адзін слой так, што на кожным метры даўжыні знаходзіцца 500 віткаў. Вызначыць сілу току ў абмотцы, калі магнітны паток у коле 0,20 Вб. Чаму роўная магнітная пранікальнасць чыгуна пры гэтай сіле току ў абмотцы? Пры рашэнні задачы выкарыстоўваць графік залежнасці  $B = f(H)$ .

21.28. Праз абмотку таройда дыяметрам  $d = 0,40$  м з жалезным сардэчнікам праходзіць ток. Вызначыць магнітную пранікальнасць жалеза, калі пры змяненні паветранага зазору ў таройдзе ад  $h_1 = 1,0$  мм да  $h_2 = 2,0$  мм паток магнітнай індукцыі змяняецца ад  $\phi_1 = 0,30$  мВб да  $\phi_2 = 0,25$  мВб.

21.29. Чаму роўны паток індукцыі ў жалезным таройдзе квадратнага сячэння са стараной  $a = 5$  см, калі ў яго аднаслойнай абмотцы з  $N = 400$  віткаў сіла току  $I = 2,0$  А? Дыяметр таройда 25 см, магнітная пранікальнасць жалеза  $\mu = 400$ .

21.30. Сферычны кандэнсатар, які запоўнены дыэлектрыкам і зараджаны да некаторай рознасці патэнцыялаў, разраджаецца праз свой дыэлектрык. Якім будзе магнітнае поле тока ў разраду ў прасторы паміж сферамі?

21.31. У аднародным магнітным полі індукцыяй  $B = 0,10$  Тл знаходзіцца прамы медны праваднік  $S = 8,0$  мм<sup>2</sup>, канцы якога падключаны гібкім правадніком да крыніцы пастаяннага току. Гібкі праваднік знаходзіцца па-за полем. Вызначыць сілу току ў правадніку, калі вядома, што пры



размяшчэнні яго перпендыкулярна лініям індукцыі поля вага правадніка ўраўнаважана сілай, якая дзейнічае на праваднік з боку поля. Вагу гібкіх праваднікоў не ўлічваць.

21.32. На каркас даўжынёй  $l = 10$  см і дыяметрам  $d = 5,0$  см намотана 150 віткоў проваду. Праз сярэдзіну каркаса ў напрамку аднаго з яго дыяметраў праходзіць медны праваднік з сілай току  $I_1 = 5,0$  А. Лічаны магнітнае поле ўнутры сярэдняй часткі саленоіда аднародным, вызначыць сілу, з якой яго дзейнічае на участак правадніка ўнутры каркаса, калі сіла току ў саленоідзе  $I_2 = 1,0$  А.

21.33. У полі бясконца доўгага прамалінейнага правадніка з сілай току  $I_1 = 20$  А знаходзіцца квадратная рамка з сілай току  $I_2 = 1,0$  А. Праваднік і рамка размешчаны ў адной плоскасці так, што дзве стараны рамкі перпендыкулярныя правадніку. Старана рамкі  $a = 10$  см, а адлегласць ад правадніка да бліжэйшай стараны рамкі  $l = 5,0$  см. Вызначыць сілу, што дзейнічае на рамку.

21.34. Чаму роўная магнутнасць магнітнай сілы, якая развіваецца пры перамяшчэнні прамалінейнага правадніка даўжынёй  $l = 20$  см са скорасцю  $v = 5,0$  м/с у аднародным магнітным полі індукцыяй  $B = 0,10$  Тл, калі вугал паміж напрамкам руху правадніка і напрамкам магнітных сілавых ліній  $\alpha = 90^\circ$ , а сіла току ў правадніку  $I = 50$  А?

21.35. На дзвюх паралельных шынах, размешчаных гарызантальна на адлегласці  $l = 10$  см, ляжыць тоўсты праваднік масай  $m = 150$  г. Шыны падключаны да крыніцы напружання, і ў правадніку ўзнікае сіла току  $I = 10$  А. Пры стварэнні магнітнага поля, вектар індукцыі якога перпендыкулярны плоскасці шин, праваднік пыходзіць у раўнамерны рух. Вызначыць індукцыю поля, калі каэфіцыент трэння правадніка аб шыны  $\mu = 0,20$ .

21.36. Электрон, які прайшоў паскараючую рознасць патэнцыялаў  $U = 500$  В, трапіў у вакууме ў аднароднае магнітнае поле і рухаецца па акружнасці радыусам  $R = 10$  см. Вызначыць модуль магнітнай індукцыі, калі скорасць электрона перпендыкулярная сілавым лініям.

21.37. Электрон, што рухаецца ў вакууме са скорасцю  $v = 10^6$  м/с, трапляе ў аднароднае магнітнае поле індукцыяй  $B = 1,2$  мТл пад вуглом  $\alpha = 30^\circ$  да сілавых ліній поля. Вызначыць радыус шрубавай лініі, па якой будзе рухацца электрон, і яе крок.

21.38. Вызначыць найменшы радыус дуантаў цыклатрона, прызначанага для паскарэння пратонаў да энергіі  $E = 0,80$  пДж, у якім індукцыя магнітнага поля  $B = 0,5$  Тл. Залежнасць масы пратона ад яго скорасці не ўлічваць.

21.39. Знайсці скорасць  $\alpha$ -часцінкі, якая пры руху ў прастору, дзе ёсць электрычнае і перпендыкулярнае яму магнітнае поле, зусім не адхіляецца. Магнітнае поле індукцыя  $B = 6,0$  мТл, напружанасць электрычнага поля  $E = 6$  кВ/м. Скорасць  $\alpha$ -часцінкі перпендыкулярная  $B$  і  $E$ .

21.40. Тонкая медная стужка таўшчынёй  $d = 0,10$  мм змешчана ў адна-

роднае магнітнае поле індукцыяй  $B = 0,90$  Тл так, што плоскасць стужкі перпендыкулярная сілавым лініям поля. У стужцы сіла току  $I = 10$  А. Вызначыць рознасць патэнцыялаў, якая ўзнікае ўздоўж шырыні стужкі, лічачы, што ў медзі ёсць па адным свабодным электроне на кожны атам.

21.41. Лічачы, што алюміній мае  $Z = 2$  свабодных электронаў на кожны атам, вызначыць рознасць патэнцыялаў, якая ўзнікае ўздоўж шырыні стужкі пры змяшчэнні яе ў аднароднае магнітнае поле з індукцыяй  $B = 0,60$  Тл. Шырыня стужкі  $b = 10$  см, шчыльнасць току ў стужцы  $J = 5,0$  МА/м<sup>2</sup>. Вектар індукцыі магнітнага поля перпендыкулярны плоскасці стужкі.

21.42. У аднародным магнітным полі індукцыяй  $B = 0,80$  Тл змешчана медная тонкая пласцінка, у якой сіла току  $I = 5,0$  А. Вектар індукцыі магнітнага поля перпендыкулярны плоскасці пласцінкі. Таўшчыня пласцінкі  $d = 0,01$  мм. Вызначыць канцэнтрацыю свабодных электронаў у медзі, калі ўзнікшая ўздоўж шырыні пласцінкі рознасць патэнцыялаў  $\Delta\varphi = 2,0$  мкВ.

21.43. Поблізу саленоіда, які ўтварае магнітнае поле індукцыяй  $B = 0,2$  Тл, накіраванага ўздоўж гарызантальнай складаючай магнітнага поля Зямлі, падвешана на вертыкальным вастрыі магнітная стрэлка масай  $m = 6,0$  г і даўжынёй  $l = 10$  см, магнітны момант якой  $p_m = 2,0$  А·м<sup>2</sup>. Вызначыць гарызантальную складаючую індукцыі магнітнага поля Зямлі, калі стрэлка здзяйсняе ваганні з перыядам  $T = 0,67$  с.

21.44. Магнітная стрэлка компаса вагаецца ў магнітным полі Зямлі. Маса стрэлкі  $m = 3,0$  г, даўжыня  $l = 6,0$  см, магнітны момант  $p_m = 3,14$  А·м<sup>2</sup>. Знайсці перыяд ваганняў стрэлкі, калі гарызантальная складаючая магнітнай індукцыі поля Зямлі  $B_0 = 20$  мкТл.

21.45. Магнітная стрэлка даўжынёй  $l = 10$  см і масай  $m = 6,0$  г падвешана на вастрыі і вагаецца ў магнітным полі Зямлі. Вызначыць гарызантальную складаючую магнітнай індукцыі поля Зямлі, калі магнітны момант стрэлкі  $p_m = 40$  А·м<sup>2</sup>, а перыяд ваганняў  $T = 0,50$  с.

21.46. Саленоід і пастаянны магніт, восі якіх размешчаны ўздоўж адной прамой, знаходзяцца на адлегласці  $d = 1,0$  м, значна большай, чым іх памеры. Вызначыць сілу ўзаемадзеяння саленоіда і магніта, калі іх магнітныя моманты  $(p_m)_1 = 1,5$  А·м<sup>2</sup> і  $(p_m)_2 = 1,0$  А·м<sup>2</sup> адпаведна.

21.47. У двух паралельных правадніках даўжынёй  $l = 5,0$  м цячэ аднолькавы ток сілай  $I = 500$  А у процілеглых напрамках. З якой сілай узаемадзейнічаюць праваднікі, калі адлегласць паміж імі  $d = 25$  см?

21.48. Батарэя акумулятараў з ЭРС  $\mathcal{E} = 120$  В і ўнутраным супраціўленнем  $r = 0,50$  Ом злучана са спажывальнікам двума меднымі паралельнымі праваднікамі, размешчанымі на адлегласці  $d = 5,0$  см адзін ад аднаго. Праваднікі замацаваны на ізалятарах, адлегласць паміж якімі  $l_1 = 50$  см. Вызначыць сілу, што дзейнічае на ізалятары пры кароткім замы-



канні на зацісках спажывальніка, калі даўжыня праваднікоў  $l_2 = 20$  м, а плошча сячэння праваднікоў  $S = 3,0$  мм<sup>2</sup>.

21.49. Тонкі магніт даўжынёй 12 см, магнітны момант якога  $6,0$  А·м<sup>2</sup>, змешчаны у аднародным магнітным полі індукцыяй  $0,2$  Тл. Вось магніта ўтварае з вектарам індукцыі магнітнага поля вугал  $90^\circ$ . Вызначыць момант сіл, што дзейнічаюць на магніт.

21.50. Вызначыць вярчальны момант, які дзейнічае на рамку з токам  $I = 10$  А у аднародным магнітным полі індукцыяй  $B = 0,50$  Тл, калі плошча рамкі  $S = 20$  см<sup>2</sup>, колькасць віткоў  $N = 50$ , а яе нармаль утварае з вектарам індукцыі магнітнага поля вугал  $\alpha = 30^\circ$ .

21.51. Рамка гальванометра, якая змяшчае  $N = 500$  віткоў плошчай  $S = 2,0$  см<sup>2</sup>, падвешана на тонкай нітцы даўжынёй  $l = 10$  см у зазоры паміж полюсамі магніта, што ўтварае магнітнае поле індукцыяй  $B = 0,20$  Тл, накіраванае радыяльна да восі вярчэння рамкі. Вызначыць цану дзялення шкалы, калі яна размешчана на адлегласці  $L = 1,0$  м ад люстэрка, а дзяленні нанесены праз  $d = 1,0$  мм. Радыус ніці  $r = 50$  мкм, модуль зруху рэчыва ніці  $G = 45$  ГПа.

21.52. Пры ўдары маланкі трубка дыяметрам  $d = 1,5$  см і таўшчынёй сценак  $h = 1,0$  мм, якая злучала маланкаадвод з зямлёй, імгненна ператварылася ў круглы стрыжань. Ацаніць сілу току разраду, калі вядома, што гранічнае напружанне, пры якім разбураецца рэчыва трубка пры сціску,  $\sigma_{пр} = 20$  ГПа.

## §22. ЭЛЕКТРАМАГНІТНАЯ ІНДУКЦЫЯ. ЭНЕРГІЯ МАГНІТНАГА ПОЛЯ

Закон электрамагнітнай індукцыі Фарадэя

$$E_i = -d\Phi/dt.$$

Пры руху правадніка даўжынёй  $l$  у магнітным полі індукцыяй  $B$

$$E_i = Blv \sin \alpha,$$

дзе  $v$  — скорасць руху правадніка;  $\alpha$  — вугал паміж скорасцю і вектарам індукцыі магнітнага поля.

Заряд, які індукцыруецца ў замкнутым контуры супраціўленнем  $R$ , пры змяненні ў ім магнітнага патоку ад  $\Phi_1$  да  $\Phi_2$

$$Q = \frac{1}{R} (\Phi_1 - \Phi_2).$$

Індуктыўнасць саленоіда

$$L = \mu\mu_0 n^2 V,$$

дзе  $n$  — колькасць віткоў на адзінцы даўжыні саленоіда,  $V$  — яго аб'ём.

ЭРС самаіндукцыі

$$E_c = -L \frac{dI}{dt}.$$



Магнітны паток, які ствараецца токам  $I$ , у катушцы індуктыўнасцю  $L$   
 $\Phi = LI$ .

Узаемная індуктыўнасць двух салеаноідаў, якія маюць агульны сярдэчнік,  
 $L_{12} = \mu\mu_0 n_1 n_2 V$ .

Імгненнае значэнне сілы току ў ланцугу, што ўтрымлівае ЭРС  $\mathcal{E}$ , супраціўленне  $R$  і індуктыўнасць  $L$ , праз час  $t$  пасля замыкання

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-(R/L)t}).$$

Пры размыканні ланцуга

$$I = I_0 e^{-(R/L)t},$$

дзе  $I_0$  — сіла току ў ланцугу пры  $t = 0$ ;  $t$  — час з моманту размыкання ланцуга.

Шчыльнасць энергіі магнітнага поля

$$w = BH/2.$$

Магнітная энергія шпулі з токам

$$W = LI^2/2.$$

**22.1.** Вызначыць работу, якая выконваецца супраць магнітных сіл пры перамяшчэнні правадніка даўжынёй  $l = 0,20$  м з токам  $I = 5$  А перпендыкулярна лініям магнітнай індукцыі  $B = 100$  мТл, калі перамяшчэнне правадніка  $s = 0,50$  м.

**22.2.** Віток радыусам  $10$  см з пастаянным токам  $I = 20$  А змешчаны ў магнітнае поле з індукцыяй  $1$  Тл так, што яго нармаль утварае вугал  $60^\circ$  з вектарам магнітнай індукцыі. Вызначыць работу, якую неабходна выканаць супраць магнітных сіл, каб вынесці віток з поля.

**22.3.** Вызначыць рознасць патэнцыялаў, якая ўзнікае на канцах вертыкальнай аўтамабільнай антэны даўжынёй  $l = 1,2$  м пры руху аўтамабіля з усходу на захад у магнітным полі Зямлі са скорасцю  $v = 20$  м/с. Гарызантальная складаючая магнітнага поля Зямлі  $B_0 = 20$  мкТл.

**22.4.** Алюмініевы дыск радыусам  $R = 40$  см верціцца вакол вертыкальнай восі з частатой  $n = 40$  аб/с. Якая рознасць патэнцыялаў паміж цэнтрам і краем дыска, калі вертыкальная складаючая магнітнага поля Зямлі  $B = 50$  мкТл?

**22.5.** Чыгуначныя рэйкі ізаляваны адна ад адной і ад зямлі і злучаны праз мілівальтметр. Што пакажа прыбор, калі па рэйках пройдзе цягнік скорасцю  $20$  м/с? Вертыкальную складаючую індукцыі магнітнага поля Зямлі лічыць роўнай  $B = 50$  мкТл, а адлегласць паміж рэйкамі  $1,54$  м. Самаіндукцыю не ўлічваць.

**22.6.** Чаму роўная індукцыя аднароднага магнітнага поля, калі пры вярчэнні ў ім прамалінейнага правадніка даўжынёй  $l = 0,2$  м вакол аднаго з яго канцоў з вуглавой скорасцю  $\omega = 50$  рад/с на канцах правадніка ўзнікае рознасць патэнцыялаў  $U = 0,2$  В?

**22.7.** Рамка, плошча якой  $S = 5,0$  см<sup>2</sup> і колькасць віткоў  $n = 10$ , далучана

да балістычнага гальванометра з унутраным супраціўленнем  $R_1 = 58 \text{ Ом}$  і змешчана паміж полюсамі электрамагніта так, што лініі магнітнай індукцыі перпендыкулярныя плошчы рамкі. Вызначыць індукцыю поля, створанага электрамагнітам, калі пры павароце рамкі на  $180^\circ$  у ланцугу гальванометра праходзіць зарад  $Q = 30 \text{ мкКл}$ . Супраціўленне рамкі  $R = 2,0 \text{ Ом}$ .

22.8. Да балістычнага гальванометра з унутраным супраціўленнем  $r_{\text{ун}} = 310 \text{ Ом}$  далучана кольца радыусам  $R = 1,0 \text{ м}$  з алюмініевага дроту сячэннем  $S = 1,0 \text{ мм}^2$ . На якую адлегласць адхіліцца «зайчык» на шкале, калі кольца, якое ляжыць на сталі, перавярнуць з аднаго боку на другі? Вертыкальная складаючая індукцыі магнітнага поля Зямлі  $B_0 = 50 \text{ мкТл}$ . «Зайчык» адхіляецца на  $1 \text{ мм}$  пры праходжанні праз рамку гальванометра зараду  $10^{-8} \text{ Кл}$  (балістычная пастаянная гальванометра  $C_0 = 10^{-8} \text{ Кл/мм}$ ).

22.9. Вызначыць індукцыю катушкі, калі пры змяненні ў ёй сілы току ад  $0$  да  $5 \text{ А}$  за час  $2 \text{ с}$  узнікае ЭРС самаіндукцыі  $1 \text{ В}$ .

22.10. У доўгай катушцы радыусам  $R = 2,0 \text{ см}$ , якая мае  $N = 500$  віткоў, сіла току  $I = 5,0 \text{ А}$ . Вызначыць індуктыўнасць, калі індукцыя магнітнага поля ўнутры яе  $B = 12,5 \text{ Тл}$ .

22.11. На доўгі сталеы сардэчнік сячэннем  $S = 4,0 \text{ см}^2$  намотаны саленоід з  $1000$  віткоў, па якім праходзіць ток  $I = 0,50 \text{ А}$ . Вызначыць індуктыўнасць саленоіда пры гэтых умовах, калі напружанасць магнітнага поля ўнутры саленоіда  $H = 2,0 \text{ кА/м}$ . Выкарыстаць графік  $B = f(H)$  (гл. дадатак 22).

22.12. Знайсці індуктыўнасць саленоіда, які атрымаўся пры намотванні дроту даўжынёй  $l_1 = 10 \text{ см}$ , на цыліндрычны жалезны стрыжань даўжынёй  $l_2 = 10 \text{ см}$ . Магнітная пранікальнасць жалеза  $\mu = 400$ .

22.13. На жалезны сардэчнік сячэннем  $S_1 = 5 \text{ см}^2$  і даўжынёй  $l = 30 \text{ см}$  намотаны саленоід, які ўтрымлівае  $500$  віткоў меднага дроту сячэннем  $S_2 = 1 \text{ мм}^2$ . Чаму роўная індуктыўнасць саленоіда пры падключэнні яго да акумулятара з ЭРС  $1,26 \text{ В}$ ? Унутранае супраціўленне акумулятара і супраціўленне праводзячых праваднікоў не ўлічваць. Выкарыстаць графік  $B = f(H)$ .

22.14. На агульны каркас намотаны дзве катушкі. Вызначыць каэфіцыент іх узаемнай індукцыі, калі пастаянны ток  $5,0 \text{ А}$  у першай катушцы стварае ў другой магнітны паток сшаплення  $40 \text{ Вб}$ .

22.15. Пры змяненні сілы току ў катушцы са скорасцю  $100 \text{ А/с}$  у другой катушцы ўзнікае ЭРС  $0,2 \text{ В}$ . Вызначыць каэфіцыент узаемнай індукцыі.

22.16. Вызначыць каэфіцыент узаемнай індукцыі паміж катушкай з неферамагнітным сардэчнікам, якая ўтрымлівае  $N$  віткоў, і доўгім прамалінейным провадам, размешчаным уздоўж восі катушкі. Вышыня катушкі  $h$ , унутраны і вонкавы радыусы адпаведна роўныя  $R_1$  і  $R_2$ .

22.17. Катушка дыяметрам  $10 \text{ см}$ , што ўтрымлівае  $200$  віткоў, знаходзіцца ў магнітным полі, індукцыя якога павялічваецца ад  $2$  да  $6 \text{ Тл}$  за



0,1 с. Вызначыць сярэдняе значэнне ЭРС індукцыі ў катушцы, калі плоскасць віткаў перпендыкулярная лініям магнітнай індукцыі.

22.18. Вызначыць залежнасць ад часу ЭРС індукцыі, якая ўзнікае ў рамцы плошчай  $20 \text{ см}^2$ , змешчанай у магнітнае поле, калі магнітная індукцыя змяняецца па закону  $B = 0,03(1 + e^{-2t})$ . Плошча рамкі перпендыкулярная вектару магнітнай індукцыі.

22.19. Дыяметр каркаса саленоіда  $d = 0,10 \text{ м}$ . Саленоід змяшчае  $N = 500$  віткаў. Пры падключэнні яго да акумулятара з ЭРС  $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$  праз  $t = 1,0 \times 10^{-3} \text{ с}$  сіла току ў ланцугу дасягае значэння  $I = 2,0 \text{ А}$ . Вызначыць даўжыню саленоіда, калі яго супраціўленне  $R = 3,0 \text{ Ом}$ , а супраціўленні акумулятара і падводзячых праваднікоў можна не ўлічваць.

22.20. Вызначыць энергію магнітнага поля саленоіда, які мае  $N = 500$  віткаў, намотаных на кардонавы каркас радыусам  $R = 2,0 \text{ см}$  і даўжынёй  $l = 0,50 \text{ см}$ , калі сіла току ў ім  $I = 5,0 \text{ А}$ .

22.21. Радыус доўгага прамалінейнага сардэчніка саленоіда  $R = 1,0 \text{ см}$ . Саленоід змяшчае  $n = 10$  віткаў на  $1 \text{ см}$  даўжыні. Абмотка выканана з меднага дроту сячэннем  $S = 1,0 \text{ мм}^2$ . Праз які час у абмотцы саленоіда вылучыцца колькасць цеплыні, роўная энергіі магнітнага поля ў сардэчніку, калі яна злучана з крыніцай пастаяннага напружання?

22.22. У абмотцы саленоіда, супраціўленне якой  $R = 1,0 \text{ Ом}$  і індуктыўнасць  $L = 20 \text{ мГн}$ , сіла току  $I = 5,0 \text{ А}$ . Чаму роўная энергія магнітнага поля саленоіда праз  $t = 1,0 \text{ мс}$  пасля адключэння крыніцы току?

22.23. На жалезным кольцы, сярэдні дыяметр якога  $d = 20 \text{ см}$ , маецца абмотка з колькасцю віткаў  $N = 800$ . У кольцы зроблены прарэз шырынёй  $b = 1,0 \text{ мм}$ . Пры сіле току ў абмотцы  $I = 1,0 \text{ А}$  магнітная індукцыя ў прарэзе  $B = 0,8 \text{ Тл}$ . Вызначыць магнітную пранікальнасць жалеза пры гэтых умовах. Рассеянне поля на краях прарэзу не ўлічваць.

22.24. Таройд з сардэчнікам з чыстага жалеза мае абмотку, якая змяшчае  $N = 500$  віткаў. Ток у абмотцы  $I = 2 \text{ А}$ . Сячэнне таройда  $S = 10 \text{ см}^2$ , сярэдні радыус  $R = 30 \text{ см}$ . Вызначыць магнітную энергію, назапашаную ў сардэчніку. Выкарыстаць графік  $B = f(H)$  (гл. дадатак 22).

22.25. Віток ізаляванага дроту выгнуты ў выглядзе васьмёркі, кольцы якой маюць радыусы  $r_1 = 60 \text{ см}$  і  $r_2 = 3,0 \text{ см}$ . Віток знаходзіцца ў магнітным полі індукцыяй  $B = 1,0 \text{ Тл}$ . Вектар магнітнай індукцыі перпендыкулярны плоскасці вітка. Ізаляцыя дроту разлічана на напружанне  $10 \text{ В}$ . Ці будзе прабіта ізаляцыя, калі магнітнае поле рэзка выключыць? Час выключэння поля  $\Delta t = 10^{-3} \text{ с}$ .

22.26. У вертыкальным магнітным полі з вялікай вышыні падае кольца дыяметрам  $d$ , зробленае з тонкага дроту. Плоскасць кольца ўвесь час гарызантальная. Знайсці скорасць падзення кольца, калі індукцыя магнітнага поля змяняецца з вышынёй па закону  $B = B_0(1 + \alpha h)$ .



## § 23. ПЕРАМЕННЫ ТОК. ЭЛЕКТРАМАГНІТНЫЯ ВАГАННІ І ХВАЛІ

Эфектыўныя значэнні сілы пераменнага току і пераменнага напружання:

$$I_{\text{эф}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt; \quad U_{\text{эф}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt,$$

дзе  $T$  — перыяд току,  $i$  і  $u$  — імгненныя значэнні сілы току і напружання адпаведна.

У выпадку сінусаідальнага току

$$I_{\text{эф}} = I_m / \sqrt{2}; \quad U_{\text{эф}} = U_m / \sqrt{2},$$

дзе  $I_m, U_m$  — амплітуды сілы току і напружання адпаведна.

Пры паслядоўным злучэнні элементаў ланцуга поўнае супраціўленне пераменнаму току

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2},$$

дзе  $R, L, C$  — актыўнае супраціўленне, індуктыўнасць і ёмістасць ланцуга адпаведна;  $\omega$  — кругавая частата.

Імгненная магутнасць пераменнага току

$$N = I_{\text{эф}} U_{\text{эф}} \cos \varphi,$$

дзе  $\varphi$  — зрух фазы паміж токамі і напружаннем.

Перыяд свабодных затухаючых ваганняў вагальнага контуру

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2}}.$$

Лагарыфічны дэкрэмент затухання

$$\theta = \frac{R}{2L} T.$$

Скорасць распаўсюджвання электрамагнітных ваганняў у ізатропным асяроддзі з дыэлектрычнай пранікальнасцю  $\epsilon$  і магнітнай пранікальнасцю  $\mu$ :

$$v = c / \sqrt{\epsilon \mu},$$

дзе  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$  — скорасць распаўсюджвання электрамагнітных ваганняў у вакууме.

**23.1.** Вызначыць эфектыўнае значэнне сінусаідальнага току, калі яго сярэдняе значэнне за паўперыяд 2,0 А.

**23.2.** Знайсці эфектыўнае і сярэдняе значэнні сілы току прамавугольных імпульсаў, перыяд якіх у 4 разы большы за іх працягласць, а максімальнае значэнне 0,80 А.

**23.3.** Прыбор магнітаэлектрычнай сістэмы паказвае сярэдняе значэнне вымяраемай велічыні за перыяд, а прыбор цеплавой сістэмы — эфектыўнае значэнне. Якімі будуць паказанні амперметраў гэтых сістэм пры паслядоўным іх уключэнні ў ланцуг, што сілкуецца ад аднапаўперыяднага выпрамніка, калі амплітуднае значэнне сілы току 5 А?

**23.4.** Замкнёны контур у выглядзе квадратнай рамкі, старана якой  $a = 8,0$  см, раўнамерна верціцца з вуглавой скорасцю  $\omega = 105$  рад/с у аднародным магнітным полі індукцыяй  $B = 3,0 \cdot 10^{-2}$  Тл. Вось вярчэння праходзіць

праз цэнтр рамкі і перпендыкулярная лінія поля магнітнай індукцыі. Знайсці амплітуднае і эфектыўнае значэнні ЭРС у контуры.

23.5. Вызначыць ёмістасць кандэнсатара, які ў ланцугу пераменнага току з частатой 50 Гц аказвае такое супраціўленне, як і рэзістар з супраціўленнем 100 Ом.

23.6. Для вызначэння індуктыўнасці дроселя яго спачатку ўключаюць у ланцуг пастаяннага току, а затым у ланцуг пераменнага току частатой  $\nu = 50$  Гц. Паралельна да дроселя падключаны электрадынамічны вальтметр. Вызначыць індуктыўнасць дроселя, калі пры праходжанні праз яго пастаяннага току  $I_1 = 3,0$  А паказанне вальтметра  $U_1 = 15$  В, а пры пераменным току  $I_2 = 2,0$  А —  $U_2 = 120$  В.

23.7. У сетку напружаннем 220 В уключаны паслядоўна катушка індуктыўнасцю 0,16 Гн, праваднік супраціўленнем 2,0 Ом і кандэнсатар ёмістасцю 64 мкФ. Вызначыць сілу току ў ланцугу, калі частата яго 200 Гц. Пры якой частаце настане рэзананс напружанняў і якія будуць пры гэтым сіла току і напружанне на зацісках катушкі і кандэнсатара?

23.8. Дуга Пятрова сілкуецца токам прамысловай частаты з эфектыўным напружаннем 127 В. Вызначыць індуктыўнасць дроселя з актыўным супраціўленнем 1 Ом, які патрэбна ўключыць паслядоўна з дугой, каб атрымаць сілу току 20 А пры супраціўленні дугі 2,0 Ом.

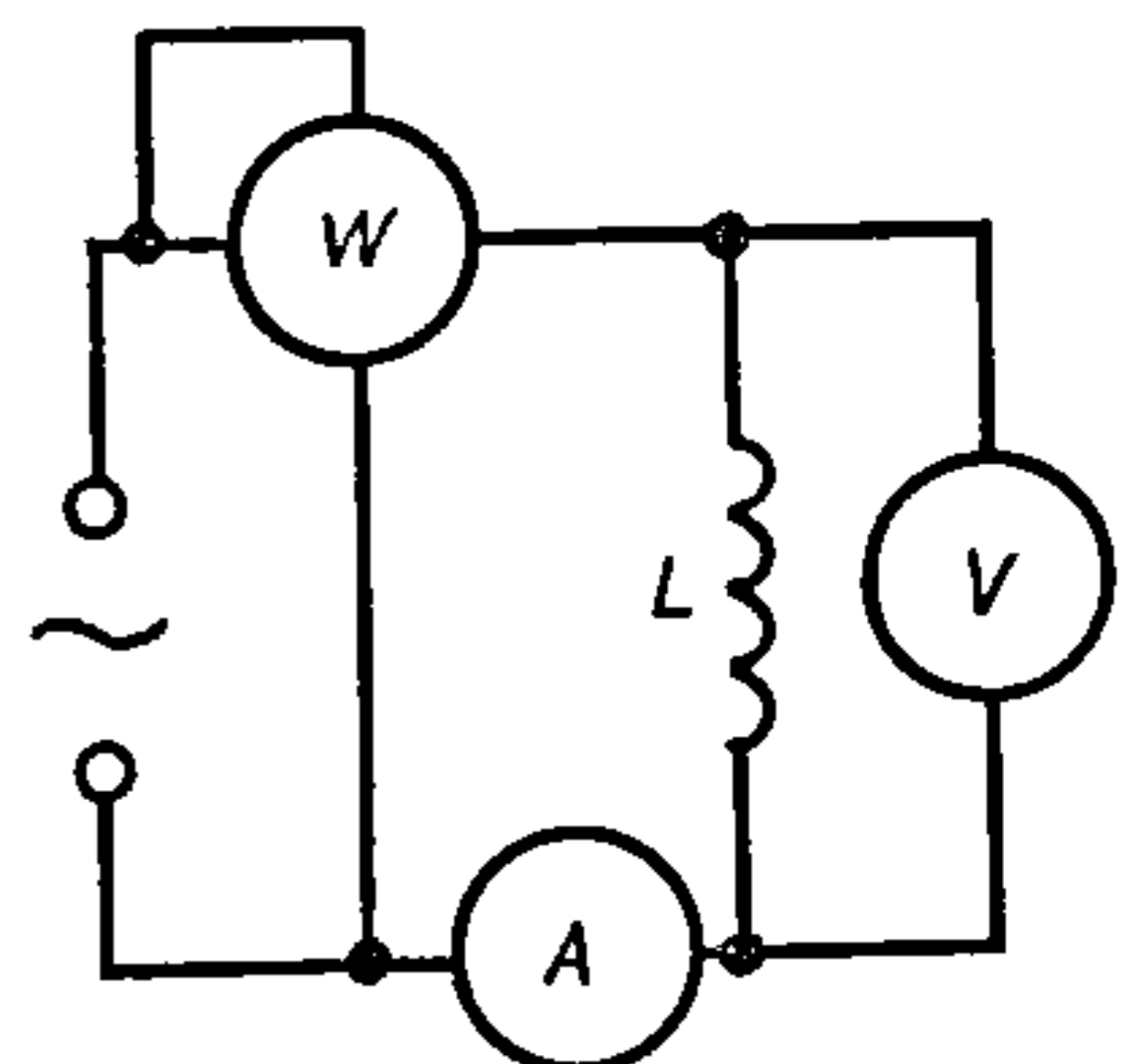
23.9. Неонавая лампа, якая загараецца і гасне пры напружанні 84 В, уключана ў ланцуг пераменнага току прамысловай частаты з эфектыўным напружаннем 120 В. Вызначыць час паміж успышкамі і працягласць успышкі.

23.10. Ртутна-кварцавая лампа ПРК-2 падключана да крыніцы пераменнага напружання частатой 50 Гц праз дросель індуктыўнасцю 0,10 Гн. Вызначыць актыўнае супраціўленне дроселя, калі напружанне на ім 180 В, а эфектыўная сіла току 4,0 А.

23.11. Кандэнсатар ёмістасцю 5 мкФ і праваднік супраціўленнем 150 Ом уключаны паслядоўна ў ланцуг пераменнага току з напружаннем 120 В і частатой 50 Гц. Вызначыць максімальнае і эфектыўнае значэнні сілы току, зрух фаз паміж токам і напружаннем, а таксама эфектыўную магутнасць.

23.12. Вызначыць эфектыўнае значэнне сілы току, эфектыўную магутнасць і зрух фаз паміж токам і напружаннем, калі праваднік супраціўленнем 150 Ом і кандэнсатар ёмістасцю 5,0 мкФ уключаны паралельна ў ланцуг пераменнага току напружаннем 120 В і частатой 50 Гц.

23.13. У ланцуг пераменнага току частатой 50 Гц уключаны катушка індуктыўнасці, вальтметр, амперметр і ватметр (рыс. 23.1). Паказанні вальтметра, амперметра і ватметра адпаведна 120 В, 10 А і 900 Вт. Вызначыць каэфіцыент самаіндукцыі



Рыс. 23.1



катушкі, яе актыўнае супраціўленне і зрух фаз паміж токам і напружаннем.

23.14. У ланцуг пераменнага току з эфектыўным напружаннем 220 В падключаны паслядоўна катушка індуктыўнасцю 0,50 Гн і актыўным супраціўленнем 10 Ом і кандэнсатар ёмістасцю 0,50 мкФ. Вызначыць эфектыўныя значэнні сілы току і магутнасці.

23.15. Тры аднолькава зараджаныя кандэнсатары ёмістасцю  $C = 5,0$  мкФ кожны злучаюць у батарэю і падключаюць да катушкі, актыўнае супраціўленне якой  $R = 20$  Ом і індуктыўнасць  $L = 0,02$  Гн. У колькі разоў будуць адрознівацца перыяды затухаючых ваганняў, калі кандэнсатары злучыць адзін раз паралельна, а другі — паслядоўна?

23.16. Рэзанансная частата вагальнага контура, які складзены з паслядоўна злучаных кандэнсатара і катушкі індуктыўнасці,  $\nu_0 = 4$  кГц. Вызначыць індуктыўнасць катушкі, калі вядома, што поўнае супраціўленне гэтага контуру пераменнаму току частатой  $\nu = 1$  кГц роўна  $Z = 1$  кОм, а актыўнае супраціўленне катушкі  $R = 10$  Ом.

23.17. Зараджаны кандэнсатар ёмістасцю 0,50 мкФ падключылі да катушкі індуктыўнасцю 5,0 мГн. Праз які час ад моманту падключэння катушкі энергія электрычнага поля кандэнсатара стане роўнай энергіі магнітнага поля катушкі? Актыўнае супраціўленне катушкі не ўлічваць.

23.18. Вызначыць ёмістасць кандэнсатара вагальнага контуру, калі вядома, што індуктыўнасць катушкі роўная 5,0 мГн, а максімальныя значэнні сілы току і напружання на кандэнсатары адпаведна 10 А і 50 В. Актыўнае супраціўленне катушкі не ўлічваць.

23.19. Вагальны контур складаецца з кандэнсатара ёмістасцю 4,0 мкФ і катушкі індуктыўнасцю 10 мГн. Пры якім актыўным супраціўленні контуру ў ім яшчэ могуць узнікнуць электрамагнітныя ваганні?

23.20. Вызначыць частату ўласных ваганняў вагальнага контуру, складзенага з кандэнсатара ёмістасцю  $C = 2,0$  мкФ і катушкі даўжынёй  $l = 0,10$  м і радыусам  $R = 1,0$  см, якая ўтрымлівае  $N = 500$  віткоў, калі актыўнае супраціўленне катушкі можна не ўлічваць, а магнітная пранікальнасць асяроддзя  $\mu = 1$ .

23.21. Вагальны контур складзены з кандэнсатара ёмістасцю 2,0 мкФ і катушкі індуктыўнасцю 0,10 Гн і супраціўленнем 10 Ом. Вызначыць лагарыфмічны дэкрэмент затухання ваганняў.

23.22. Вызначыць актыўнае супраціўленне вагальнага контуру, індуктыўнасць якога  $L = 1,0$  Гн, калі праз  $t = 0,10$  с амплітуднае значэнне напружання на кандэнсатары зменшылася ў  $n = 4$  разы.

23.23. Вызначыць частату ўласных ваганняў вагальнага контуру, калі максімальнае напружанне на яго кандэнсатары ёмістасцю  $C = 0,50$  мкФ  $U_m = 100$  В, а максімальная сіла току ў катушцы  $I_m = 50$  мА. Актыўнае супраціўленне катушкі не ўлічваць.

23.24. Якую энергію неабходна падвесці да вагальнага контуру з лагарыфмічным дэкрэментам затухання  $\theta = 0,03$ , каб падтрымліваць у ім зату-

хаючыя ваганні на працягу  $t = 1$  гадз., калі ёмістасць кандэнсатара контуру  $C = 0,050$  мкФ, індуктыўнасць катушкі  $L = 2,0$  мГн, а максімальная сіла току ў ёй  $I_m = 0,5$  А?

23.25. На якую даўжыню хвалі настроены радыёпрыёмнік, калі ёмістасць яго вагальнага контуру  $450$  пФ, а індуктыўнасць катушкі  $1,5$  мГн?

23.26. Вызначыць скорасць распаўсюджвання электрамагнітных ваганняў у шкале, калі  $\epsilon = 7$ ,  $\mu = 1$ .

23.27. Двухправодная лінія звязана індуктыўна з генератарам электрамагнітных ваганняў і апушчана ў спірт. Вызначыць частату генератара, калі адлегласць паміж максімумамі ў стаячай хвалі  $0,50$  м, а адносныя значэнні дыэлектрычнай і магнітнай пранікальнасцей спірта адпаведна роўныя  $26$  і  $1$ .

23.28. Пры падачы напружання  $U_1 = 100$  В на першасную абмотку трансфарматара з тарайдальным ферытавым сардэчнікам, магнітная пранікальнасць якога  $\mu_1 = 2000$ , напружанне на яго разамкнутай другаснай абмотцы складае  $U_2 = 199$  В. Якое напружанне было б на разамкнутай другаснай абмотцы, калі б магнітная пранікальнасць сардэчніка была  $\mu_2 = 20$ ? Рассейванне магнітнага патоку і страты ў сардэчніку не ўлічваць. Каэфіцыент трансфармацыі трансфарматара  $k = 2$ .



## Раздзел IV

### ОПТИКА

#### § 24. ІНТЭРФЕРЭНЦЫЯ СВЯТЛА

Пры інтэрферэнцыі дзвюх кагерэнтных хваляў адлегласць паміж узнікаючымі на экране дзвюма суседнімі інтэрферэнцыйнымі палосамі вызначаецца суадносінай

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda,$$

дзе  $l$  — адлегласць ад экрана да крыніцы святла;  $d$  — адлегласць паміж крыніцамі святла.

Пры адбіцці ад плоскапаралельнай пласцінкі, якая знаходзіцца ў паветры, аптычная рознасць ходу светлавых хваляў

$$\Delta = 2hncos\beta + \lambda/2,$$

дзе  $h$  — таўшчыня пласцінкі;  $n$  — паказчык праламлення пласцінкі;  $\beta$  — вугал праламлення.

Умова максімумаў інтэнсіўнасці светлавых хваляў пры інтэрферэнцыі

$$\Delta = \pm k\lambda,$$

дзе  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Умова мінімумаў

$$\Delta = \pm (2k + 1)\lambda/2.$$

Радыусы светлых і цёмных кольцаў Ньютана

$$r_m = \sqrt{\frac{R\lambda}{2}} (m - 1),$$

дзе  $m = 1, 2, 3, \dots$

У адбітым святле цотным  $m$  адпавядаюць радыусы светлых кольцаў, няцотным — цёмных, у праходзячым святле — наадварот.

**24.1.** Адлегласць паміж дзвюма кагерэнтнымі крыніцамі святла ( $\lambda = 0,5$  мкм) роўная 0,1 мм. Адлегласць паміж інтэрферэнцыйнымі максімумамі ў сярэдняй частцы інтэрферэнцыйнай карціны роўная 1 см. Вызначыць адлегласць ад крыніц святла да экрана.

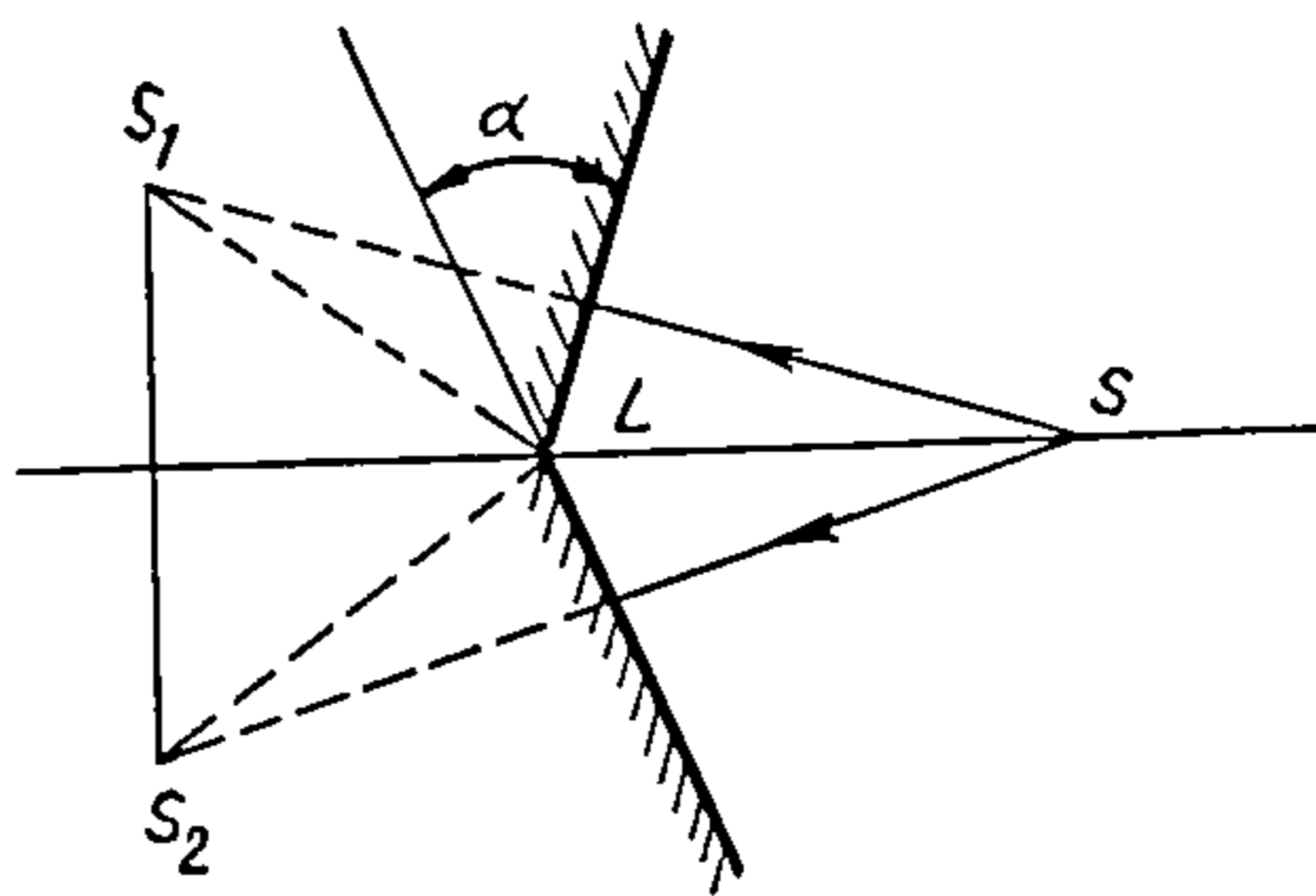
**24.2.** На біпрызму Фрэнеля падае святло ( $\lambda = 600$  нм) ад крыніцы. Вызначыць адлегласць паміж суседнімі інтэрферэнцыйнымі максімумамі, якія ўтвараюцца на экране ў выніку інтэрферэнцыі, калі адлегласць ад крыніцы да прызмы 1 м, а ад прызмы да экрана 4 м. Праламляючы вугал прызмы  $2 \cdot 10^{-3}$  рад, паказчык праламлення яе  $n = 1,5$ .

**24.3.** Знайсці лік  $N$  палос інтэрферэнцыі, утвораных біпрызмай з паказчыкам праламлення  $n$  і праламляючым вуглом  $\varphi$ , калі даўжыня хвалі крыніцы  $\lambda$ . Адлегласць ад крыніцы святла да біпрызмы  $a$ , а ад біпрызмы да экрана  $b$ .

**24.4.** На біпрызму Фрэнеля падае монахраматычнае святло з даўжынёй



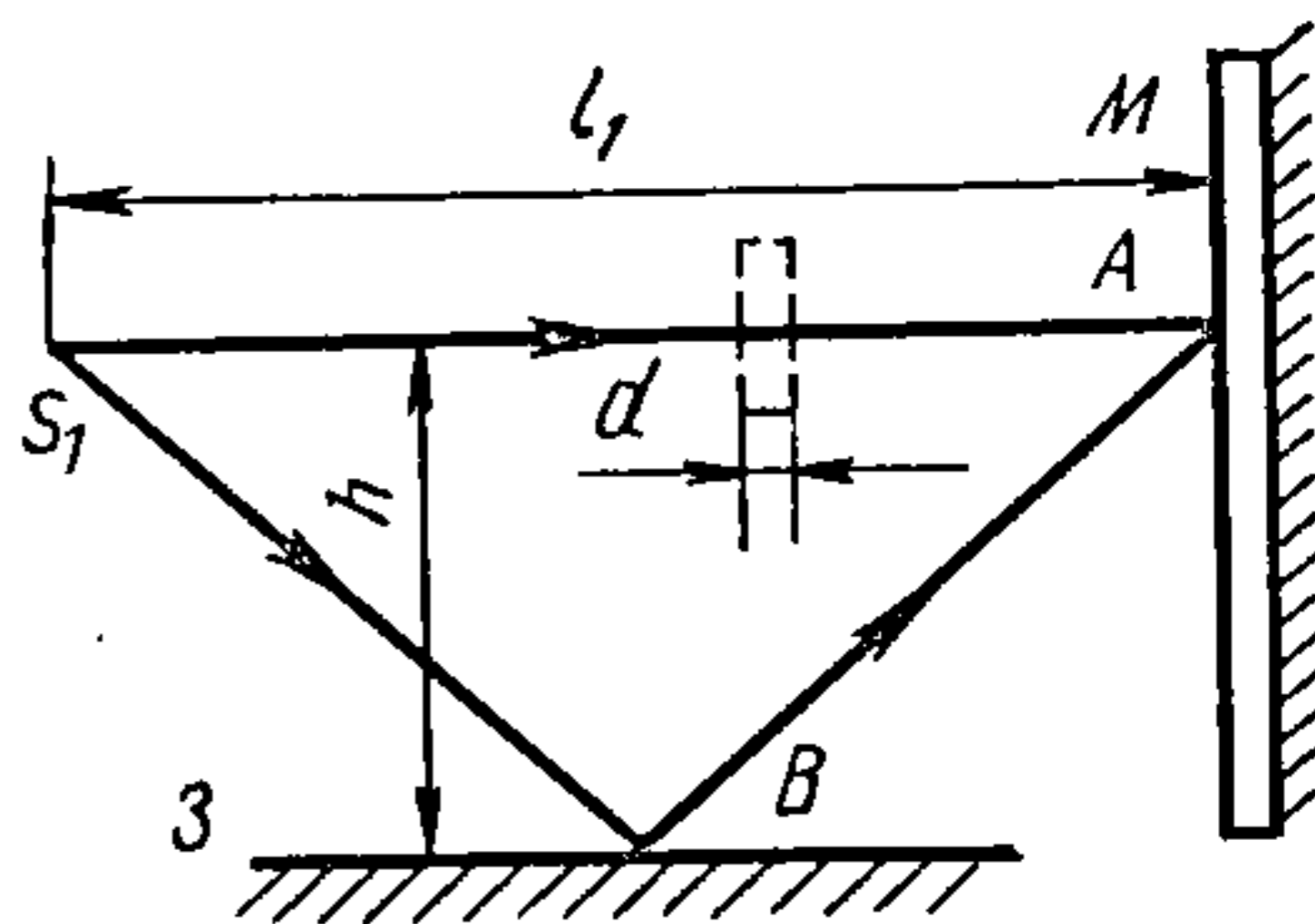
Рыс.24.1



Рыс.24.2

хвалі  $\lambda = 589$  мкм. Інтэрферэнцыйная карціна назіраецца на экране, дзе на 1 см укладваецца 21 светлая паласа. Калі змяніць даўжыню хвалі крыніцы святла, то на 1 см укладваецца 19,25 паласы. Якая даўжыня хвалі ў новай крыніцы святла?

24.5. На люстры Фрэнеля, пастаўленыя пад вуглом  $\alpha = 10^\circ$  (рыс. 24.1.), падае святло ад шчыліны, якая знаходзіцца на адлегласці  $r = 10$  см ад лініі перасячэння люстраў. Даўжыня хвалі крыніцы  $\lambda = 600$  нм. Адбітае святло дае інтэрферэнцыйную карціну на экране, размешчаным на адлегласці  $L = 270$  см ад лініі перасячэння люстраў. Вызначыць адлегласць паміж інтэрферэнцыйнымі палосамі  $\Delta x$  на экране і найбольшую шырыню шчыліны  $\Delta s$ , пры якой можа назірацца інтэрферэнцыйная карціна.



Рыс.24.3

24.6. Крыніца святла знаходзіцца на адлегласці  $L$  ад лініі перасячэння люстраў Фрэнеля (рыс. 24.2). Знайсці залежнасць адлегласці першых інтэрферэнцыйных максімаў, назіраемых на экране, ад вугла  $\alpha$  паміж люстрамі.

24.7. Знайсці вугал  $\alpha$  паміж люстрамі Фрэнеля, калі адлегласць  $x$  паміж максімамі інтэрферэнцыі на экране 1 мм, адлегласць  $a$  ад лініі перасячэння люстраў да экрана 1 м, а да крыніцы  $r = 1$  см. Даўжыня хвалі монахраматычнага святла  $\lambda = 0,486$  мкм. Інтэрферуючыя прамяні падаюць на экран нармальна.

24.8. Інтэрферэнцыйная карціна на экране  $M$  атрымліваецца з дапамогай схемы, якая паказана на рыс. 24.3. Крыніца, размешчаная на адлегласці  $l_1 = 1$  м ад экрана, выпраменьвае монахраматычнае святло ( $\lambda = 0,5$  мкм). Плоскасць люстра  $3$  паралельная праменю  $S_1A$  і знаходзіцца ад яго на адлегласці  $h = 2$  мм. Вызначыць, што будзе назірацца ў пункце  $A$ : узмацненне ці аслабленне? Як зменіцца асвятляльнасць у гэтым пункце, калі на шляху праменя  $S_1A$  перпендыкулярна яму паставіць плоскапаралельную



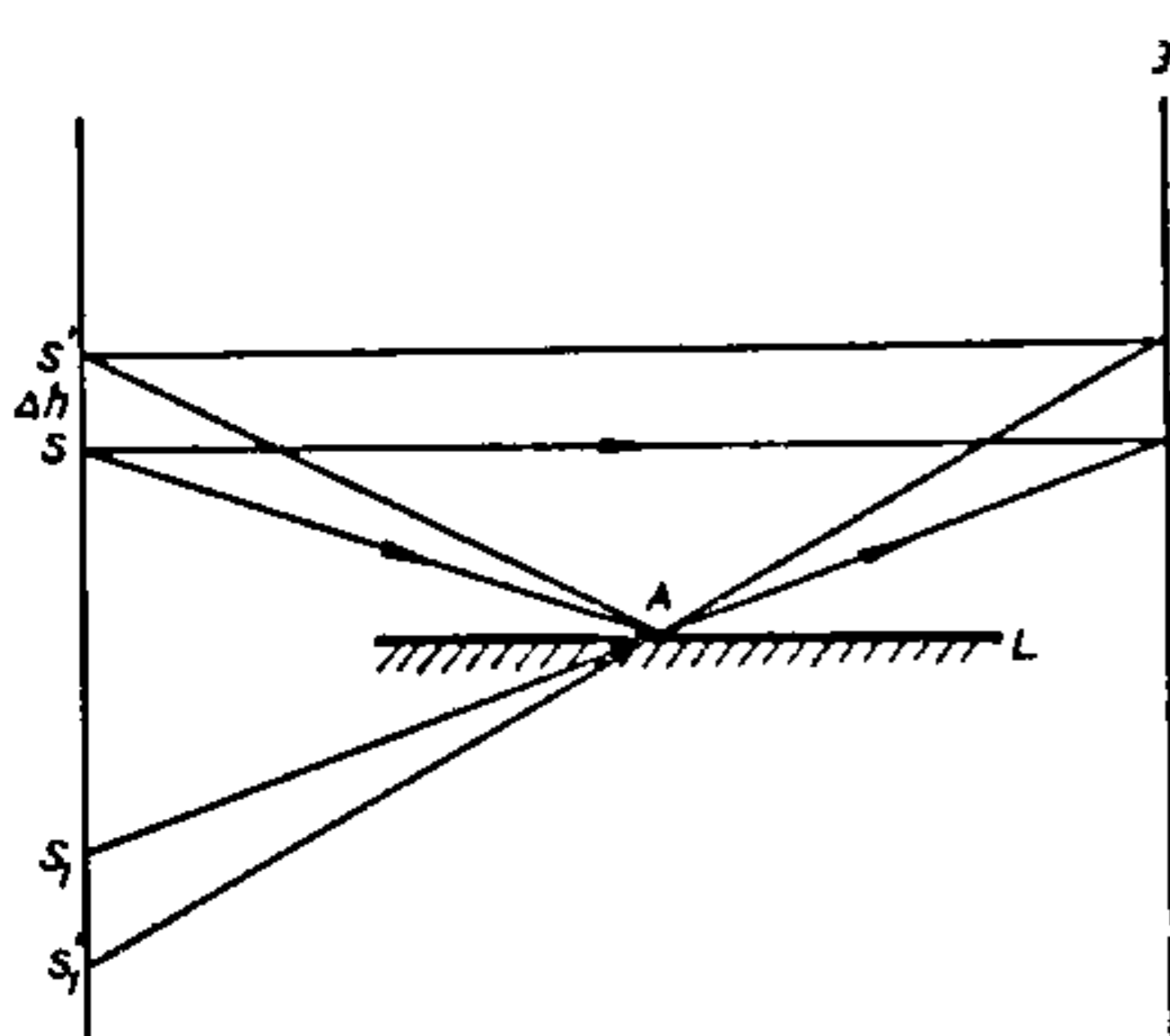


Рис. 24.4

пласцінку ( $n = 1,55$ ) таўшчынёй  $d = 6$  мкм?

24.9. У вопыце Лойда інтэрфэрэнцыя на экране адбываецца ў выніку накладання праменя, які падае ад крыніцы  $S$ , і праменя, адбітага ад люстра  $L$  (рыс. 24.4). Знайсці даўжыню хвалі святла, калі вядома, што адлегласць ад крыніцы да экрана  $l = 100$  см. Шырыня інтэрфэрэнцыйнай паласы  $\Delta x = 0,25$  мм, а пасля таго, як крыніцу  $S$  аднеслі ад плоскасці люстра на  $\Delta h = 0,6$  мм, шырыня інтэрфэрэнцыйных палос зменшылася ў  $n = 1,5$  раза.

24.10. На дыяфрагму з дзвюма вузкімі шчылінамі, адлегласць паміж якімі  $d = 2,5$  мм, падае нармальна монахраматычнае святло. Інтэрфэрэнцыйная карціна ўтвараецца на экране, які знаходзіцца на адлегласці  $l = 100$  см ад дыяфрагмы. Куды і на якую адлегласць зрушацца інтэрфэрэнцыйныя палосы, калі адну са шчылін закрыць шкляной пласцінай таўшчынёй  $h = 1$  мкм і з паказчыкам праламлення  $n = 1,5$ ?

24.11. Прамяні ад крыніцы святла з даўжынёй хвалі  $500$  нм падаюць на разрэзаную напалам збіральную лінзу. На экране ўзнікаюць інтэрфэрэнцыйныя палосы. Растворыць іх паходжанне і вызначыць адлегласць паміж цёмнымі палосамі. Крыніца святла знаходзіцца на адлегласці  $a = 20$  см ад лінзы, фокусная адлегласць якой  $F = 10$  см. Палавіны лінзы рассунулі на  $d = 1$  мм. Адлегласць ад лінзы да экрана  $l = 450$  см.

24.12. З цэнтральнай часткі збіраючай лінзы дыяметрам  $D = 5$  см выразалі палоску шырынёй  $d = 5$  мм, а астатнія часткі ссунулі шчыльна. На якой адлегласці ад лінзы можна назіраць інтэрфэрэнцыйную карціну, калі пунктавая крыніца святла знаходзіцца ад лінзы на адлегласці  $a = 75$  см?

24.13. Дзве кагерэнтныя крыніцы святла з даўжынёй хвалі  $\lambda = 480$  нм ствараюць на экране інтэрфэрэнцыйную карціну. Калі на шляху аднаго з пучкоў паставіць тонкую кварцавую пласціну з паказчыкам праламлення  $n = 1,46$ , то інтэрфэрэнцыйная карціна зрушыцца на  $m = 69$  палос. Знайсці таўшчыню пласціны.

24.14. Тонкая плёнка з паказчыкам праламлення  $n = 1,5$  асвятляецца рассеяным святлом з даўжынёй хвалі  $\lambda = 600$  нм. Пры якой мінімальнай таўшчыні плёнкі знікнуць інтэрфэрэнцыйныя палосы? Назіранне вядзецца ў адбітым святле.

24.15. На плоскай празрыстай паверхні ўтворана тонкая празрыстая плёнка таўшчынёй  $0,396$  мкм. Які колер будзе мець плёнка пры асвятленні яе белым святлом, што падае пад вуглом  $30^\circ$ ? Паказчык праламлення шкла  $1,5$ , плёнкі —  $1,4$ .

24.16. На шкляную пласцінку ( $n_1 = 1,5$ ) нанесена празрыстая плёнка ( $n_2 = 1,4$ ). На плёнку нармальна да паверхні падае монахраматычнае

святло ( $\lambda = 600$  нм). Якая павінна быць найменшая таўшчыня плёнкі, калі ў выніку інтэрферэнцыі адбітыя прамяні максімальна аслабленыя?

24.17. Знайсці мінімальную таўшчыню плёнкі з паказчыкам праламлення  $n = 1,33$ , пры якой святло з даўжынёй хвалі  $\lambda = 0,64$  мкм, што падае на яе, максімальна адбіваецца, а святло з  $\lambda = 0,40$  мкм пры тых жа ўмовах не адбіваецца зусім.

24.18. Вызначыць таўшчыню пласта масла на паверхні вады, калі пры назіранні пад вуглом  $60^\circ$  да нармалі ў спектры адбітага святла наглядасца значна ўзмоцненая жоўтая лінія з даўжынёй хвалі  $\lambda = 0,589$  мкм. Паказчык праламлення масла 1,6.

24.19. Якімі павінны быць межы змены таўшчыні пласцінкі з паказчыкам праламлення  $n = 1,6$ , каб можна было назіраць інтэрферэнцыйны максімум 10-га парадку для святла з даўжынёй хвалі  $\lambda = 500$  нм?

24.20. Размешчаная вертыкальна клінападобная мыльная плёнка назіраецца пад вуглом  $90^\circ$  да вертыкалі ў адбітым святле праз чырвонае шкло, якое прапускае прамені з даўжынёй хвалі 631 нм. Адлегласць паміж суседнімі чырвонымі палосамі 3 мм. Якая адлегласць паміж сінімі палосамі, калі іх назіраць праз сіняе шкло, што прапускае святло з даўжынёй хвалі 460 нм?

24.21. У тонкай клінападобнай пласцінцы ў адбітым святле пры нармальным падзенні прамянёў з даўжынёй хвалі 450 нм назіраюцца цёмныя інтэрферэнцыйныя палосы, адлегласць паміж якімі 1,5 мм. Знайсці вугал паміж гранямі пласцінкі, калі паказчык праламлення пласцінкі 1,5.

24.22. Пры асвятленні клінападобнай пласцінкі пучком паралельных прамянёў натрыевага полымя ( $\lambda_1 = 589$  нм), што падаюць нармальна да паверхні, утвараюцца інтэрферэнцыйныя палосы. На даўжыні 13 мм укладваецца 46 цёмных палос. Затым пласцінку асвятляюць святлом з даўжынёй хвалі  $\lambda_2 = 499$  нм. Вызначыць лік цёмных палос, якія ўкладваюцца ў гэтым выпадку на той жа даўжыні.

24.23. Паветраны клін, які мае найбольшую таўшчыню 0,01 мм, утвораны гарызантальнай паверхняй і плоскапаралельнай шкляной пласцінкай. Пры асвятленні пласцінкі вертыкальнымі праменьнямі з даўжынёй хвалі 0,580 мкм назіральнік бачыць у адбітым святле інтэрферэнцыйныя палосы. Калі ў прастору паміж пласцінкай і паверхняй увесці вадкасць, то лік інтэрферэнцыйных палос павялічыцца на 12. Знайсці паказчык праламлення вадкасці. Лічыць вугал падзення прамянёў на мяжу паветранага кліна роўным нулю, бо вугал пры вяршыні кліна вельмі малы.

24.24. Чаму цэнтр кольцаў Ньютана, якія назіраюцца у праходзячым святле, звычайна светлы?

24.25. Ва ўстаноўцы для назірання кольцаў Ньютана плоскавыпуклая лінза зроблена рухомай і можа перамяшчацца ў напрамку, перпендыкулярным пласціне. Што будзе адбывацца з кольцамі Ньютана пры аддаленні лінзы ад пласціны і набліжэнні да яе? Кольцы ўзнікаюць з дапамогай монахраматычнага святла.



24.26. На ўстаноўку для атрымання кольцаў Ньютана падае нармальна монахраматычнае святло ( $\lambda = 0,5$  мкм). Вызначыць таўшчыню паветранага слоя там, дзе ў адбітым святле назіраецца 5-е светлае кольца.

24.27. Аптычная сіла плоскавыпуклай лінзы ( $n = 1,5$ ) роўная 0,5 дптр. Лінза выпуклым бокам ляжыць на шкляной пласцінцы. Вызначыць радыус 7-га цёмнага кольца Ньютана ў праходзячым святле.

24.28. Дзве плоскавыпуклыя лінзы прыціснуты шчыльна выпуклымі паверхнямі, радыусы якіх  $R_1$  і  $R_2$ . Вызначыць радыус  $r_n$   $n$ -га цёмнага кольца, калі даўжыня падаючай светлавой хвалі  $\lambda$ . Назіранне вядзецца ў адбітым святле.

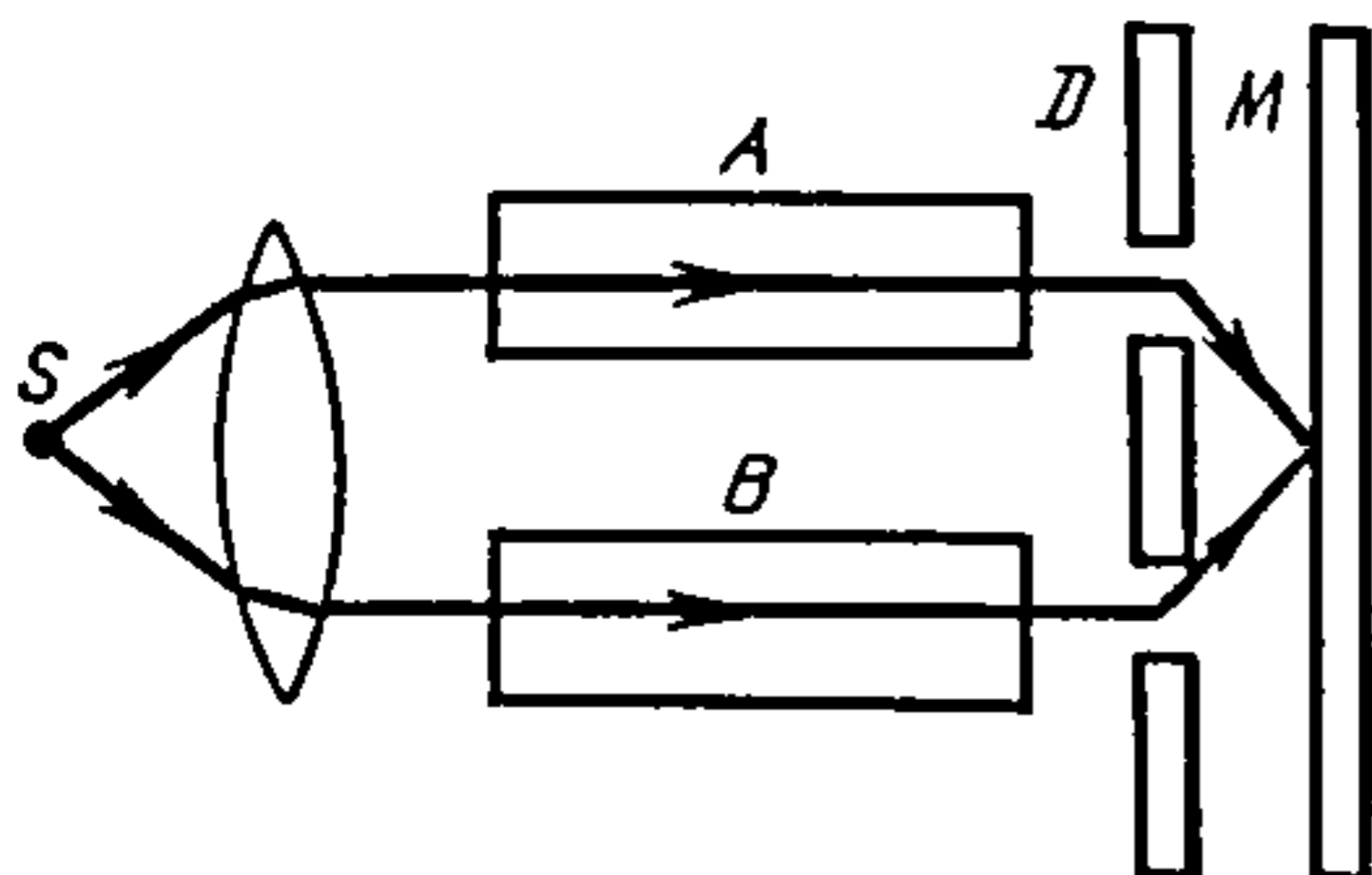
24.29. Несіметрычная дваякавыпуклая лінза ляжыць адной з сваіх паверхняў на плоскапаралельнай пласціне. Пры назіранні кольцаў Ньютана ў адбітым святле з  $\lambda = 589$  нм радыус  $r_1$  20-га цёмнага кольца атрымаўся роўным 2 мм, калі ж лінзу пераклалі на пласцінку другой паверхняй, радыус  $r_2$  таго ж цёмнага кольца стаў 4 мм. Вызначыць фокусную адлегласць лінзы, калі яе паказчык праламлення 1,5.

24.30. Якая адлегласць паміж 20-м і 21-м максімумамі светлых кольцаў Ньютана, калі адлегласць паміж 2-м і 3-м — 1 мм, а назіраюць іх у адбітым святле?

24.31. Плоскавыпуклы кусок шклянога цыліндра ляжыць на плоскапаралельнай пласцінцы. На прыладу падае нармальна паралельны пучок святла. Якой будзе форма інтэрферэнцыйных палос? Як зменіцца адлегласць паміж палосамі пры аддаленні ад лініі дотыку цыліндра і пласцінкі? Радыус цыліндра  $R$ .

24.32. Паміж плоскавыпуклай лінзай і шкляной пласцінкай, на якой яна ляжыць, няма кантакту з прычыны пападання пылу. Пры гэтым радыус 5-га цёмнага кольца Ньютана 0,8 мм. Калі пыл выдаліць, радыус гэтага кольца будзе 0,1 см. Знайсці таўшчыню слою пылу, калі радыус крывізны лінзы 10 см. Назіранне вядзецца ў праходзячым святле.

24.33. Паміж шкляной пласцінкай і плоскавыпуклай лінзай, што ляжыць на ёй, знаходзіцца вадкасць. Які яе паказчык праламлення, калі пры назіранні ў адбітым святле ( $\lambda = 600$  нм) радыус 10-га цёмнага кольца Ньютана 2,1 мм? Радыус крывізны лінзы 1 м.



Рыс.24. 5

24.34. Інтэрферометр, паказаны на рыс. 24.5, вымярае паказчык праламлення празрыстых рэчываў. Тут  $S$  — шчыліна, на якую падае монахраматычнае святло ( $\lambda = 589$  нм);  $D$  — дыяфрагма з дзвюма шчылінамі; даўжыня трубак  $A$  і  $B$ , запоўненых паветрам, роўная 10 см. Калі трубку  $A$  запоўніць аміякам, то інтэрферэнцыйная карціна на экране зрушыцца ўгору на  $N = 10$  палос. Вызначыць паказчык праламлення аміяку.

24.35. Вызначыць паказчык праламлення плёнкі, што прасвятляе паверхню шкла ( $n = 1,67$ ), якое знаходзіцца ў паветры.

24.36. Паверхня шкляной пласцінкі прасветлена для жоўтай вобласці спектра. Паказчык праламлення прасветленай плёнкі для жоўтых прамянёў  $1,28$ . Якую частку падаючага патоку адаб'е пласцінка ў вобласці спектра  $\lambda = 600$  нм,  $\lambda = 400$  нм? Паказчык праламлення шкла і плёнкі для фіялетавых прамянёў лічыць на  $0,01$  большым за адпаведныя паказчыкі праламлення для жоўтых прамянёў.

24.37. Два пучкі белага святла, атрыманыя ад адной пунктавай крыніцы, падаюць на ўваходную шчыліну аптычнай спектральнай прылады. Рознасць ходу  $300$  м. Вызначыць распазнавальную магчымасць спектральнай прылады, якая можа выявіць інтэрферэнцыю гэтых пучкоў.

## § 25. ДЫФРАКЦЫЯ СВЯТЛА

Радыус  $k$ -й зоны Фрэнеля пры праходжанні сфэрычнай хвалі праз круглую адтуліну

$$\rho_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b} k \lambda},$$

дзе  $a$  — адлегласць ад дыфрагмы з круглай адтулінай да пунктавай крыніцы святла;  $b$  — адлегласць дыфрагмы ад экрана, на якім назіраецца дыфракцыйная карціна;  $k$  — нумар зоны Фрэнеля. Умова галоўных максімуў інтэнсіўнасці ў выпадку фраўнгоферавай дыфракцыі на дыфракцыйнай рашотцы пры нармальным падзенні прамянёў:

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda,$$

дзе  $d$  — перыяд рашоткі;  $\varphi$  — вугал дыфракцыі;  $k$  — нумар галоўнага максімума.

Вуглавая дысперсія дыфракцыйнай рашоткі

$$D_\varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda} = \frac{k}{d \cos \varphi},$$

дзе  $\partial \varphi$  — вуглавая адлегласць паміж спектральнымі лініямі, якія адрозніваюцца па даўжыні хвалі на  $\partial \lambda$ .

Лінейная дысперсія дыфракцыйнай рашоткі

$$D_l = \partial l / \partial \lambda,$$

дзе  $\partial l$  — лінейная адлегласць паміж спектральнымі лініямі, якія адрозніваюцца па даўжыні хвалі на  $\partial \lambda$ .

Пры малых вуглах дыфракцыі

$$D_l \approx F D_\varphi.$$

Адрозніваючая сіла аб'ектыва тэлескопа

$$R = D / (1,22 \lambda),$$

дзе  $D$  — дыяметр уваходнай зрэнкі аб'ектыва.

Формула Вульфа—Брэга:

$$2d \sin \varphi = k \lambda,$$

дзе  $d$  — адлегласць паміж атамнымі плоскасцямі крышталю;  $\varphi$  — вугал слізгання;  $k$  — парадак спектра.

25.1. Монахраматычнае святло падае нармальна на вузкую шчыліну. Вугал адхілення прамянёў 3-га дыфракцыйнага максімума  $1^\circ 20'$ . Колькі



даўжынь хваляў падаючага святла ўкладаецца на шырыні шчыліны?

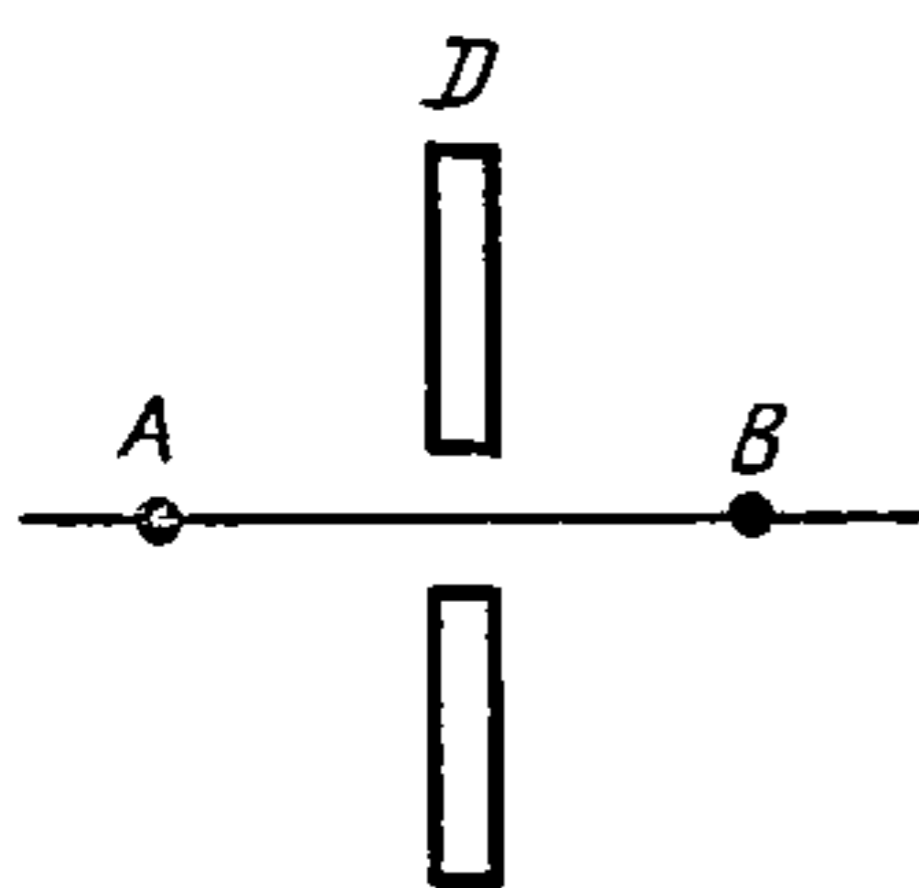
25.2. Перад дыяфрагмай з круглай адтулінай радыусам  $r = 1,0$  мм змясцілі пунктавую крыніцу святла ( $\lambda = 0,50$  мкм). Знайсці адлегласць  $b$  ад дыяфрагмы да пункта назірання, для якой лік зон Фрэнеля ў адтуліне  $n = 4$ . Адлегласць ад крыніцы святла да дыяфрагмы  $a = 1,0$  м.

25.3. Радыус 4-й зоны Фрэнеля для плоскага хвалевага фронту  $r_4 = 3$  мм. Вызначыць радыус 12-й зоны з таго ж пункта назірання.

25.4. Знайсці вуглы  $\varphi$ , якія вызначаюць месцазнаходжанне мінімумаў пры Фраўнгоферавай дыфракцыі, калі плоская хваля  $\lambda$  падае на шчыліну шырынёй  $a$  па напрамку, што стварае вугал  $\alpha$  з нармаллю да плоскасці шчыліны.

25.5. Пунктавая крыніца святла  $S$  з даўжынёй хвалі  $\lambda = 0,550$  мкм асвятляе экран, які знаходзіцца на адлегласці  $L = 11$  м ад крыніцы. Паміж крыніцай і экранам на адлегласці  $l = 5$  м ад экрана паставілі шырму з круглай адтулінай дыяметрам  $d = 4,2$  мм. Як зменіцца асветленасць атрыманай на экране дыфракцыйнай карціны ў параўнанні з той асветленасцю, якая будзе мець месца, калі шырма адсутнічае?

25.6. У пункце  $A$  (рыс. 25.1) знаходзіцца пунктавая крыніца монахраматычнага святла ( $\lambda = 500$  нм). Дыяфрагма з адтулінай радыусам  $1$  мм перамяшчаецца з пункта, які знаходзіцца на адлегласці  $50$  см ад  $A$ , у пункт, які знаходзіцца ад  $A$  на  $1,5$  м. Колькі разоў будзе назірацца зацямненне ў пункце  $B$ , калі  $AB = 2$  м?



Рыс. 25.1

25.7. На шчыліну шырынёй  $a = 0,1$  мм падае нармальна пучок монахраматычнага святла ( $\lambda = 500$  нм). Дыфракцыйная карціна назіраецца на экране, што знаходзіцца ў фокальнай плоскасці лінзы, аптычная сіла якой  $D = 5$  дптр. Знайсці адлегласць паміж мінімумамі ў 2-м парадку.

25.8. Святло ад пунктавай монахраматычнай крыніцы падае на дыяфрагму з круглай адтулінай, радыус якой можна змяняць адвольна. На экране, што знаходзіцца на адлегласці  $l_1 = 125$  см ад дыяфрагмы, атрымалася дыфракцыйная карціна. Знайсці даўжыню хвалі падаючага святла, калі ў цэнтры дыфракцыйнай карціны максімум назіраецца пры  $r_1 = 1$  мм, а наступны за ім максімум пры  $r_2 = 1,29$  мм. Адлегласць ад крыніцы да дыяфрагмы  $l_2 = 100$  см.

25.9. Дыфракцыйная рашотка мае  $100$  штрыхоў на  $1$  мм даўжыні. Вызначыць даўжыню хвалі монахраматычнага святла, якое падае на рашотку нармальна, калі вугал паміж двума Фраўнгоферавымі максімумамі 1-га парадку  $8^\circ$ .

25.10. У дыфракцыйным спектры назіраюць лінію ў першым парадку пад вуглом  $\varphi$ . Знайсці найвышэйшы парадак спектру, які можна назіраць з дапамогай гэтай рашоткі. Святло падае на яе нармальна.

25.11. Які найбольшы парадак спектра натрыю ( $\lambda = 590$  нм) можна назіраць з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі, якая мае 500 штрыхоў на 1 мм? Святло падае на рашотку пад вуглом  $30^\circ$ .

25.12. Знайсці ўмову роўнасці нулю інтэнсіўнасці  $m$ -га максімуму для дыфракцыйнай рашоткі з перыядам  $d$  і шырынёй шчыліны  $b$ .

25.13. Вылічыць найбольшы вугал, на які дыфрагуе пучок монахраматычнага святла, што падае нармальна на дыфракцыйную рашотку, якая мае 10 000 штрыхоў на 1 см пры яе шырыні 4 см. Даўжыня хвалі падаючага святла 546 нм.

25.14. Вузкую шчыліну, асветленую зялёным святлом ( $\lambda_1 = 0,540$  мкм), разглядаюць праз дыфракцыйную рашотку, якая мае 100 штрыхоў на 1 мм, з адлегласці 1,5 м. Затым зялёнае святло змянілі на чырвонае ( $\lambda_2 = 0,700$  мкм). На колькі зрушыцца спектр 1-га парадку?

25.15. Перыяд дыфракцыйнай рашоткі, што стаіць у спектраметры, 2 мкм. Пад якім вуглом да восі каліматыра трэба ўстанавіць глядзельную трубу, каб назіраць спектральную лінію з даўжынёй хвалі 410 нм?

25.16. На якой адлегласці адна ад другой знаходзяцца на экране дзве лініі спектра ртуці з даўжынёй хваляў 577 і 579 нм у спектры 1-га парадку, атрыманым з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі з перыядам 4 мкм? Фокусная адлегласць лінзы, якая праецыруе спектр на экран, 60 см. Прамяні падаюць на рашотку нармальна.

25.17. Крыніца белага святла, дыфракцыйная рашотка і экран апынуліся ў вадзе. Якія змяненні можна заўважыць у дыфракцыйнай карціне, калі вуглы адхілення малыя?

25.18. Перыяд дыфракцыйнай рашоткі 4 мкм. Дыфракцыйная карціна назіраецца з дапамогай лінзы з фокуснай адлегласцю 40 см. Вызначыць даўжыню хвалі святла, якое падае нармальна на рашотку, калі першы максімум ляжыць на адлегласці 5 см ад цэнтральнага.

25.19. Спектры 2-га і 3-га парадкаў у бачнай вобласці часткова перакрываюцца. Якой даўжыні хвалі ў спектры 3-га парадку адпавядае  $\lambda = 700$  нм у спектры 2-га парадку?

25.20. На дыфракцыйную рашотку з перыядам 2 мкм падае нармальна святло, прапушчанае праз светафільтр. Фільтр прапускае хвалі даўжынёй ад 500 да 600 нм. Будуць альбо не будуць перакрывацца спектры розных парадкаў?

25.21. Распазнавальная магчымасць дыфракцыйнай рашоткі ў вобласці зялёных прамянёў ( $\lambda = 0,550$  мкм) у спектры 1-га парадку ( $m = 1$ ) складае 55 пм. Вызначыць перыяд рашоткі.

25.22. Патрэбна атрымаць паасобныя відарысы дзвюх спектральных ліній з рознасцю даўжынь хваляў  $\Delta\lambda = 0,1$  нм. Які найменшы парадак спектра атрымаецца пры гэтым з дапамогай дыфракцыйнай рашоткі даўжынёй  $l = 1,5$  см і перыядам  $d = 5$  мкм? Лініі ляжаць у чырвонай частцы спектра ( $\lambda = 760$  нм).



25.23. Пад вуглом  $\alpha = 30^\circ$  назіраецца 4-ы максімум для даўжыні хвалі  $\lambda = 0,644$  мкм. Вызначыць перыяд дыфракцыйнай рашоткі і яе шырыню, калі яна дазваляе распазнаваць  $\Delta\lambda = 0,322$  нм.

25.24. Даказаць, што, калі перыяд рашоткі  $d$  сувымерны з шырынёй шчыліны  $a$  так, што  $d = na$ , то ў дыфракцыйным спектры знікаюць усе максімумы, нумары якіх кратныя  $n$ .

25.25. Якім павінен быць перыяд дыфракцыйнай рашоткі, каб у спектры 1-га парадку магчыма было распазнаць  $D$ -дублет натрыю (589 і 589,6 нм), прычым вугал паміж кампанентамі дублета павінен быць роўным  $5'$ ? Святло падае на рашотку нармальна.

25.26. Дыфракцыйная рашотка шырынёй 2 см мае перыяд 5 мкм. Вызначыць распазнавальную магчымасць яе ў 3-м парадку. Якая найменшая рознасць даўжынь хваляў дзвюх распазнавальных спектральных ліній у жоўтай вобласці ( $\lambda = 600$  нм)?

25.27. Параўнаць распазнавальныя магчымасці дыфракцыйных рашотак, калі адна з іх мае 420 штрыхоў на 1 мм пры шырыні 2 см, а другая 700 штрыхоў на 1 мм пры шырыні 4,8 см.

25.28. Вызначыць вуглавую дысперсію дыфракцыйнай рашоткі з перыядам 2 мкм для спектра 2-га парадку, калі  $\lambda = 500$  нм.

25.29. Якую лінейную дысперсію мае дыфракцыйная рашотка для даўжыні хвалі 0,589 мкм у спектры 2-га парадку, калі перыяд рашоткі 4 мкм, а фокусная адлегласць праецыруючай лінзы 50 см?

25.30. На вяршыні тэлевізійнай вежы на адлегласці  $l = 20$  см знаходзяцца дзве чырвоныя лампы ( $\lambda = 640$  нм). Якім павінен быць найменшы дыяметр аб'ектыва падзорнай трубы, каб гэтыя лампы можна было ўбачыць паасобку з адлегласці  $r = 15$  км?

25.31. Якой павінна быць мінімальная вуглавая адлегласць паміж двума пунктамі на паверхні Марса, каб іх можна было распазнаць у тэлескоп з дыяметрам аб'ектыва 60 см ( $\lambda = 500$  нм)? Марс знаходзіцца ў вялікім процістаянні, г. зн. адлегласць ад Зямлі складае 56 Гм.

25.32. Дыяметр люстранога аб'ектыва телескопа Крымскай абсерваторыі 2,6 м. Вызначыць распазнавальную магчымасць телескопа. Вока найбольш адчувальнае да даўжыні хвалі 550 нм.

25.33. Пучок святла ( $\lambda = 600$  нм) ад лазера, што знаходзіцца на Зямлі, факусіруюць на месячны кратэр з дапамогай телескопа, дыяметр аб'ектыва якога 2 м. Якой будзе велічыня светлавой плямы на Месяцы, калі адлегласць ад Месяца да Зямлі 384400 км? Уплыў атмасферы не ўлічваць.

25.34. Пры якім напружанні працуе рэнтгенаўская трубка, калі яе выпраменьванне падае на крышталі кальцыту ( $\text{CaCO}_3$ )? Найменшы вугал паміж паверхняй крышталю і пучком рэнтгенаўскіх прамянёў, пры якім можна заўважыць люстраное адбіццё,  $2^\circ 36'$ . Міжпласкасцевая адлегласць роўная пастаяннай рашоткі кальцыту ( $d = 304$  пм).

25.35. Пры асвятленні крышталю хларыду калію (KCl) монахраматыч-

нымі рэнтгенаўскімі прамянямі з даўжынёй хвалі 145 пм і пры вугле паміж пучком рэнтгенаўскіх прамянёў і паверхняй крышталю  $14^\circ 20'$  паяўляецца пры люстраным адбіцці максімум 1-га парадку. Знайсці адлегласць паміж суседнімі атамнымі плоскасцямі крышталю.

25.36. Якая пастаянная крышталічнай рашоткі хларыду натрыю (NaCl), калі монахраматычнае рэнтгенаўскае выпраменьванне з даўжынёй хвалі 71,2 пм люстрана адбіваецца ад яго натуральнай грані плоскасці спайнасці? Максімум 1-га парадку назіраецца пры вугле  $7^\circ 18'$ .

25.37. На крышталю кальцыту ( $\text{CaCO}_3$ ) падаюць рэнтгенаўскія прамяні даўжынёй хвалі 32 пм. Пры якім вугле паміж пучком прамянёў і паверхняй крышталю будзе назірацца інтэрферэнцыйнае люстраное адбіццё 1-га парадку? Адлегласць паміж атамнымі плоскасцямі прыняць роўнай пастаяннай рашоткі кальцыту ( $d = 304$  пм).

25.38. Рэнтгенаўскае выпраменьванне падае на натуральную грань крышталю каменнай солі (NaCl), ад якой утвараецца люстраное адбіццё 2-га парадку. Знайсці даўжыню хвалі рэнтгенаўскага выпраменьвання, калі вугал паміж пучком рэнтгенаўскіх прамянёў і паверхняй крышталю  $11^\circ 36'$ . Шчыльнасць каменнай солі  $2200 \text{ кг/м}^3$ .

## § 26. ГЕАМЕТРЫЧНАЯ ОПТЫКА

Формула сферычнага люстра:

$$\frac{1}{F} = \frac{2}{R} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

дзе  $F$  — фокусная адлегласць люстра;  $R$  — радыус крывізны люстра;  $d, f$  — адпаведна адлегласці ад прадмета і відарыса да полюса люстра.

Закон праламлення святла

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

дзе  $\alpha$  — вугал падзення;  $\beta$  — вугал праламлення;  $n_{21}$  — адносны паказчык праламлення другога асяроддзя адносна першага;  $n_1, n_2$  — абсалютныя паказчыкі праламлення першага і другога асяроддзя.

Формула тонкай лінзы:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f},$$

дзе  $d, f$  — адлегласці ад аптычнага цэнтра лінзы да прадмета і да відарыса адпаведна.

Аптычная сіла тонкай лінзы:

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

дзе  $n$  — адносны паказчык праламлення лінзы.

Аптычная сіла сістэмы дзвюх тонкіх лінз, якія складзены,

$$D = D_1 + D_2,$$

дзе  $D_1, D_2$  — аптычныя сілы лінз.



Папярэчнае павялічэнне ў люстрах і лінзах

$$\Gamma = H/h,$$

дзе  $h$  і  $H$  — вышыня прадмета і вышыня відарыса.

Павелічэнне лупы

$$\Gamma = L/F,$$

дзе  $L$  — адлегласць найлепшага зроку;  $F$  — фокусная адлегласць лупы.

Павелічэнне мікраскопа

$$\Gamma = Ld / (F_1 F_2),$$

дзе  $L$  — адлегласць найлепшага зроку;  $d$  — адлегласць паміж аб'ектывам і акулярарам;  $F_1, F_2$  — фокусныя адлегласці аб'ектыва і акулара адпаведна.

Павелічэнне тэлескопа

$$\Gamma = F_1 / F_2,$$

дзе  $F_1, F_2$  — фокусныя адлегласці аб'ектыва і акулара адпаведна.

## Адбіццё святла

**26.1.** У шматлікіх вымяральных прыладах ролю стрэлкі адыгрывае светлавая прамень, адбіты ад маленькага плоскага люстэрка. На які вугал павернецца люстэрка, калі адбіты прамень перамясціўся па шкале на 32 мм? Адлегласць ад шкалы да люстэрка 2 м.

**26.2.** Даказаць, што для атрымання відарыса чалавека на поўны рост у плоскім люстэрку вышыня люстэрка павінна быць не меншая за палову росту чалавека.

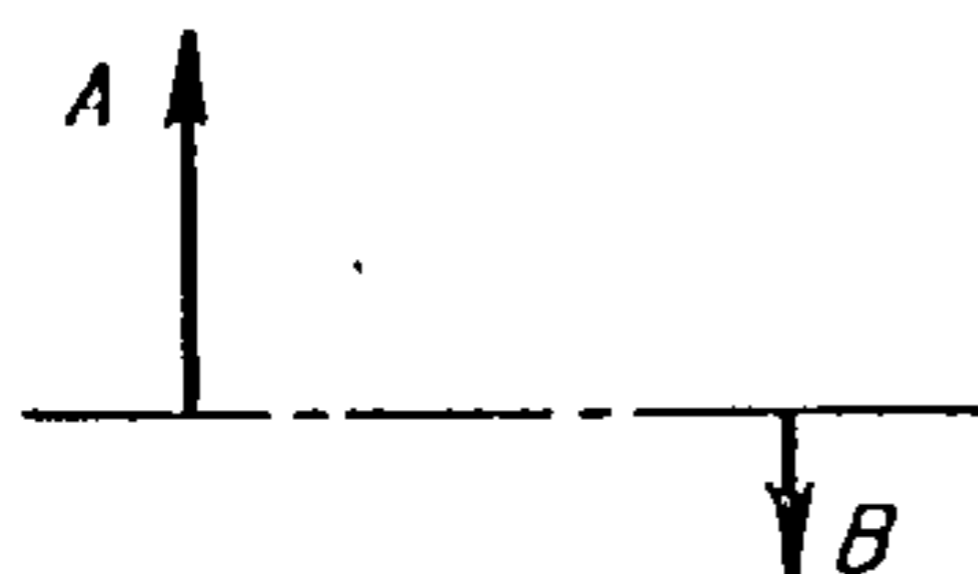
**26.3.** Вызначыць вугал паміж двума плоскімі люстэркамі, калі пунктавая крыніца святла і два яе відарысы ў гэтых люстэрках ляжаць у вяршыні роўнастаронняга трохвугольніка. Зрабіць чарцёж.

**26.4.** Як размясціць два плоскія люстэркі, каб пры любым вугле падзення падаючы прамень і прамень, адбіты ад абодвух люстэркаў, былі паралельныя адзін аднаму?

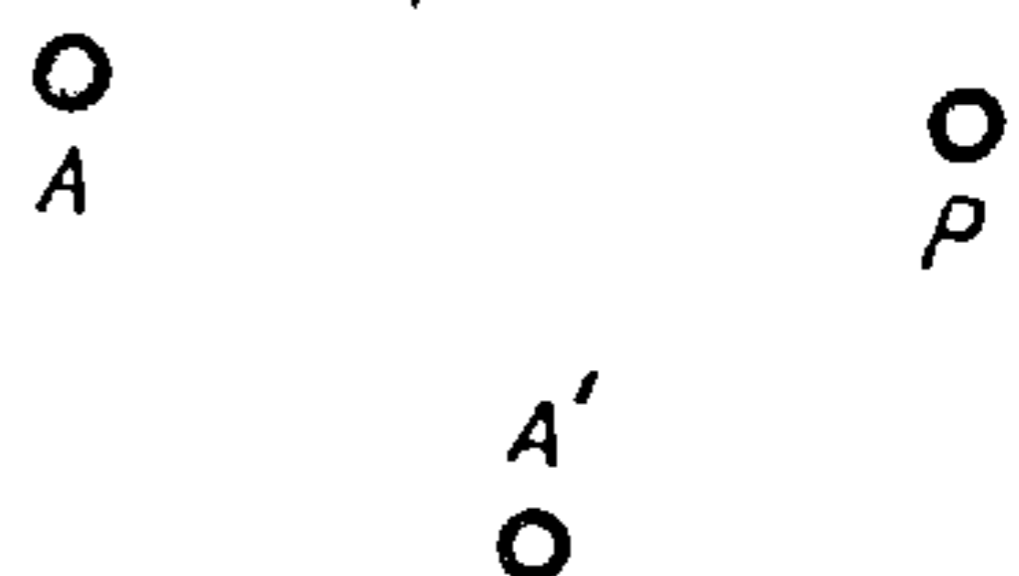
**26.5.** Пры дапамозе сферычнага люстэрка атрыманы відарыс прадмета  $A$  (рыс. 26.1). Пабудовай ходу прамянёў вызначыць месцазнаходжанне і фокус люстэрка. Увагнутае яно ці выпуклае?

**26.6.** Вядома месцазнаходжанне прадмета  $A$  і яго відарыса  $A'$  адносна полюса  $P$  сферычнага люстэрка (рыс. 26.2). Дзе месцазнаходжанне люстэрка і дзе яго фокус?

**26.7.** Вызначыць фокусную адлегласць увагнутага сферычнага люстэр-



Рыс. 26.1



Рыс. 26.2

ка, калі яно дае сапраўдны відарыс прадмета, павялічаны ў 4 разы. Адлегласць паміж прадметам і яго відарысам 15 см.

26.8. радыус крывізны ўвагнутага люстэрка 40 см. Знайсці месцазнаходжанне прадмета, пры якім яго відарыс будзе: сапраўдным і павялічаным у 2 разы; уяўным і павялічаным у 2 разы.

26.9. Прадмет знаходзіцца на адлегласці 15 см ад вяршыні ўвагнутага люстэрка на яго аптычнай восі. Відарыс атрымаўся на адлегласці 30 см ад люстэрка. Знайсці, куды і на колькі перамесціцца відарыс, калі прадмет наблізіць да люстэрка на 1 см.

26.10. На галоўнай аптычнай восі сферычнага люстэрка радыусам 40 см знаходзіцца пунктавая крыніца святла  $S$  на адлегласці 30 см ад люстэрка. На якой адлегласці ад увагнутага люстэрка трэба паставіць плоскае люстэрка, каб прамяні, адбітыя ад увагнутага, а затым і плоскага люстэрка, прайшлі праз пункт  $S$ ?

26.11. Пучок прамянёў, які сыходзіцца, падае на выпуклае люстэрка так, што пункт перасячэння прадоўжаных прамянёў знаходзіцца на восі люстэрка на адлегласці 20 см ад яго. Пасля адбіцця гэтых прамянёў перасякаюць аптычную вось на адлегласці 0,6 м ад люстэрка. Знайсці фокусную адлегласць люстэрка.

26.12. Два аднолькавыя ўвагнутыя сферычныя люстэркі пастаўлены так, што іх галоўныя фокусы супадаюць. Пунктавая крыніца святла знаходзіцца на агульнай аптычнай восі на адлегласці  $a$  ад першага люстэрка. Дзе атрымаецца відарыс пасля адбіцця прамянёў ад абодвух люстэрак?

26.13. Чалавек глядзіць ва ўвагнутае сферычнае люстэрка і бачыць прамы відарыс свайго вока. Вуглавы памер гэтага відарыса ў 1,5 раза большы за вуглавы памер відарыса, які атрымаўся б у плоскім люстэрку, размешчаным на такой жа адлегласці, роўнай 20 см. Знайсці радыус крывізны люстэрка.

26.14. Пунктавая крыніца святла раўнамерна рухаецца па акружнасці радыусам 0,5 м. Лінейная скорасць яе вярчэння 3 м/с. На адлегласці 5 м ад цэнтра акружнасці перпендыкулярна яго восі вярчэння знаходзіцца сферычнае люстэрка радыусам крывізны 2 м. Знайсці паскарэнне, з якім рухаецца відарыс крыніцы ў люстэрку.

### Праламленне святла

26.15. Слупок вышыняй 1 м убіты ў дно сажалкі так, што цалкам знаходзіцца пад вадой. Вызначыць даўжыню ценю ад слупка на дне сажалкі, калі прамяні сонца падаюць на паверхню вады пад вуглом  $30^\circ$ .

26.16. Прамень белага святла падае пад вуглом  $60^\circ$  на плоскапаралельную пласцінку. Крайні чырвоны і фіялетавы прамяні светлавога пучка, які выходзіць з процілеглай грані пласцінкі, знаходзяцца адзін ад аднаго на адлегласці 0,3 мм. Вызначыць таўшчыню пласцінкі, калі паказчык праламлення шкла для крайніх чырвоных прамянёў 1,51, а для крайніх фіялетавых 1,53.



26.17. Прамень святла праламляецца на мяжы паветра — шкло. Пры якім вугле падзення праломлены прамень утвораць з адбітым вугал  $90^\circ$ ? Які найменшы вугал паміж адбітым і праломленым прамянямі?

26.18. На колькі змяняецца даўжыня хвалі чырвоных прамянёў пры пераходзе з паветра ў шкло, калі паказчык праламлення шкла для гэтых прамянёў 1,51, а частата іх  $\nu = 4 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ ?

26.19. Вызначыць гранічны вугал, пры якім адбываецца поўнае адбіццё ў алмазе.

26.20. У вадзе ідуць два паралельныя прамяні. Першы прамень на мяжы вада — паветра поўнаасцю адбіваецца. На шляху другога праменя на паверхні вады знаходзіцца плоскапаралельная пласцінка. Ці зможа выйсці другі прамень з вады, альбо таксама поўнаасцю адаб'ецца?

26.21. Чалавек паглядзеў на дно вадаёма ў вертыкальным напрамку зверху ўніз і вызначыў яго глыбіню. Яна атрымалася роўнай 90 см. Якая сапраўдная глыбіня вадаёма?

26.22. На паверхні слою чатыроххларыстага вугляроду ( $n_1 = 1,46$ ) таўшчынёй 4,0 см плавае слой вады ( $n_2 = 1,33$ ) таўшчынёй 2,0 см. На якой уяўнай глыбіні будзе знаходзіцца дно пасудзіны пры нармальным падзенні праменя?

26.23. У плоскім люстэрку назіраецца відарыс свечкі. Што адбудзецца з ім, калі паміж люстэркам і свечкай паставіць плоскапаралельную шкляную пласцінку?

26.24. Пучок паралельных прамянёў падае на паверхню вады пад вуглом  $30^\circ$ . Шырыня пучка ў паветры 5 см. Знайсці шырыню пучка ў вадзе.

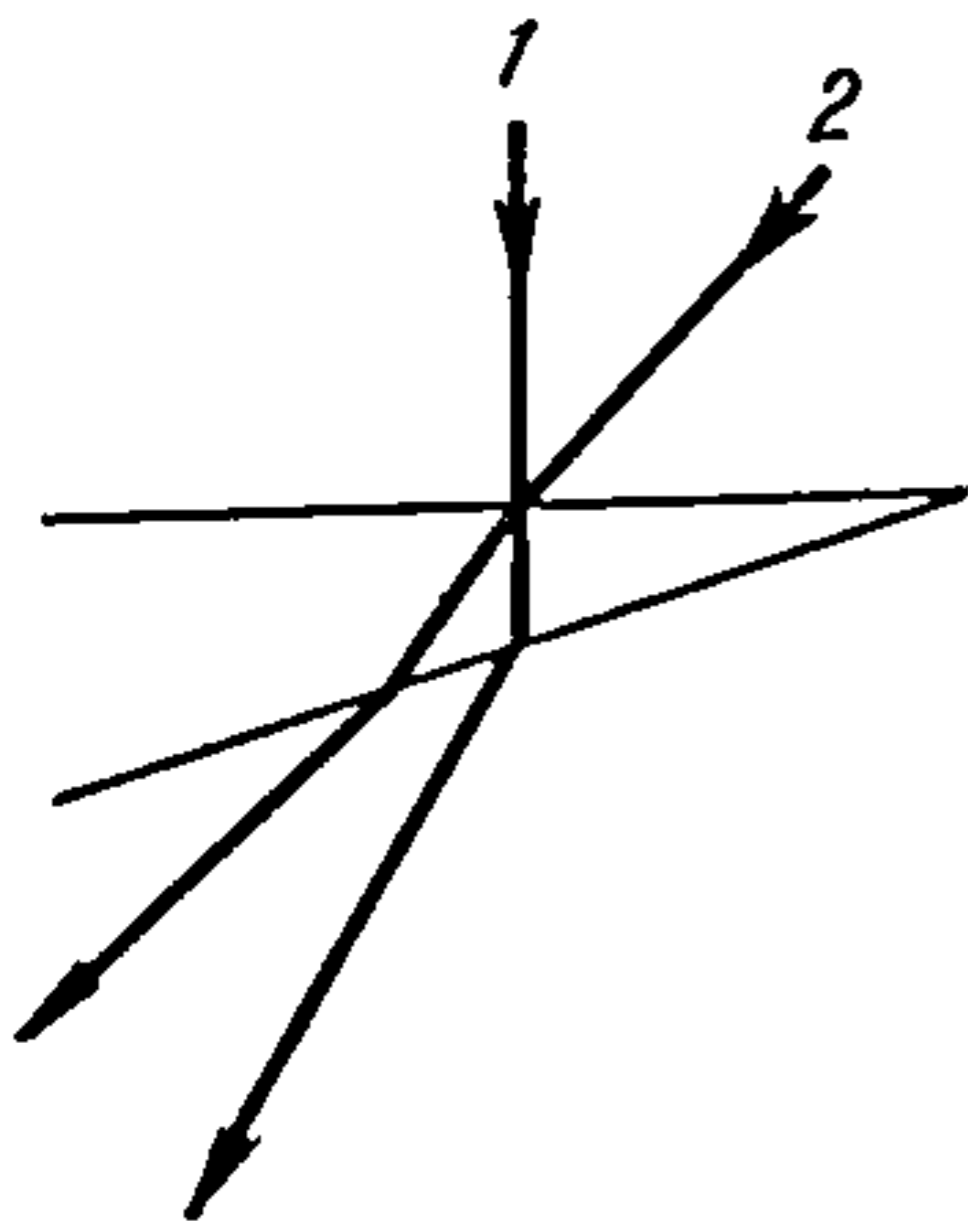
26.25. На якой глыбіні пад вадой знаходзіцца вадалаз, калі ён бачыць адбітымі ад паверхні вады тыя часткі гарызантальнага дна, якія знаходзяцца ад яго на адлегласці 15 м і больш? Рост вадалаза 1,7 м.

26.26. На вышыні  $h$  над паверхняй вады размешчана пунктавая крыніца святла  $S$ . Дзе будзе знаходзіцца відарыс  $S'$  гэтай крыніцы, атрыманы плоскім люстраным дном пасудзіны, калі глядзець па вертыкалі ўніз? Глыбіня пасудзіны з вадой  $d$ , паказчык праламлення вады 1,33.

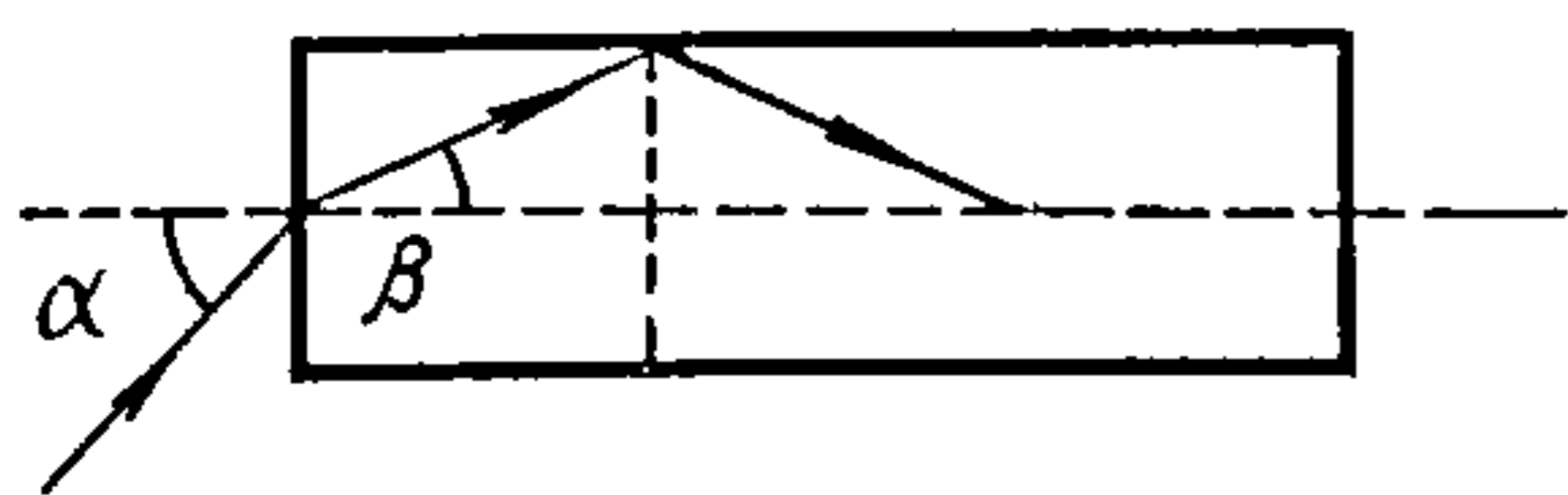
26.27. Прамень святла падае нармальна на грань шклянога кліна з малым вуглом пры вяршыні (рыс. 26.3). На які вугал павернецца праломлены прамень пры павароце падаючага праменя на малы вугал вакол восі, перпендыкулярнай плоскасці рысунка?

26.28. На шкляную прызму з праламляльным вуглом  $60^\circ$  і паказчыкам праламлення 1,5 падае прамень святла пад вуглом  $30^\circ$ . Які вугал праламлення праменя пры выхадзе яго з прызмы?

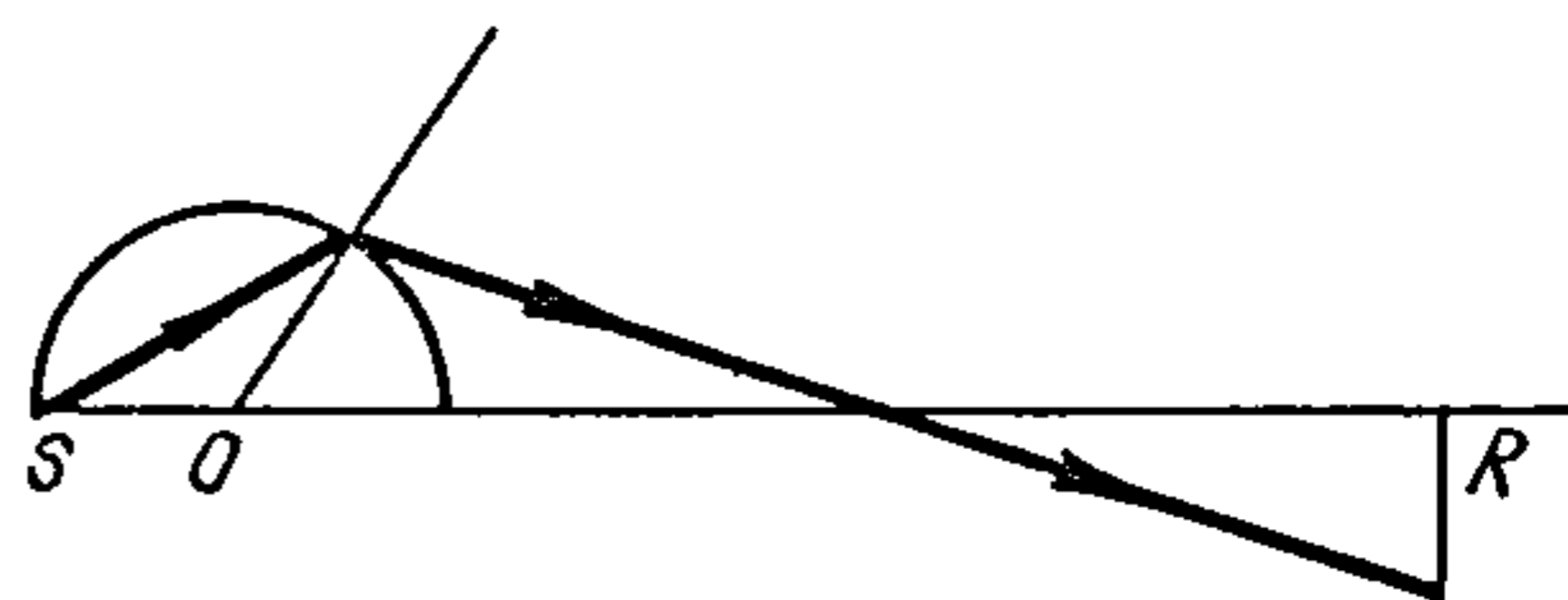
26.29. Белое святло праходзіць праз прызму і раскладаецца ў спектр. Чаму прызма поўнага



Рыс.26.3



Рыс.26.4

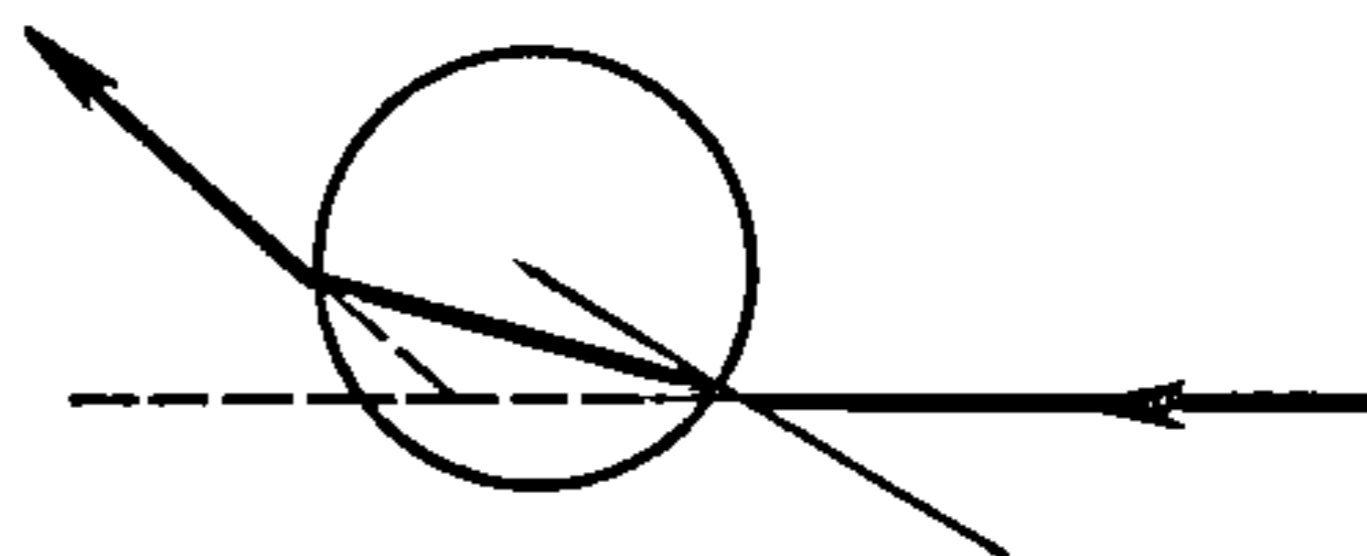


Рыс.26.5

адбіцця дае неафарбаваны відарыс?

26.30. Праламляльны вугал шкляной прызмы  $60^\circ$ . Пад якім вуглом прамяні павінны падаць на прызму, каб пры выхадзе слізгаць уздоўж паверхні процілеглай грані? Паказчык праламлення шкла 1,6.

26.31. Прызма з праламляльным вуглом  $30^\circ$  мае адну грань пасярэбраную. Прамень, які падае на другую грань пад вуглом  $45^\circ$ , пасля праламлення і адбіцця ад пасярэбранай грані вярнуўся назад па тым жа напрамку. Вызначыць паказчык праламлення рэчыва прызмы.



Рыс.26.6

26.32. На тарэц шклянога стржня падае святло пад вуглом  $\alpha$  (рыс. 26.4). Якім павінен быць найменшы паказчык праламлення шкла, каб святло не змагло выйсці праз бакавую паверхню стржня незалежна ад вугла  $\alpha$ ?

26.33. Унутры суцэльнага шара радыусам  $R$  з паказчыкам праламлення  $n = 2$  злева ад цэнтра паблізу паверхні знаходзіцца пунктавая крыніца святла  $S$  (рыс. 26.5). На якой адлегласці справа ад цэнтра шара радыус светлавога пучка, што выходзіць з шара, будзе роўны  $R$ ?

26.34. Прамень святла з паветра трапляе на аднародны празрысты шар, утвараючы ў яго і даходзіць да паверхні падзелу шар — паветра. Які вугал  $\varphi$  будзе паміж праменем, што падае на шар, і праменем, што выходзіць з шара, калі вугал падзення праменя  $26^\circ$ , а вугал праламлення  $17^\circ$  (рыс. 26.6)?

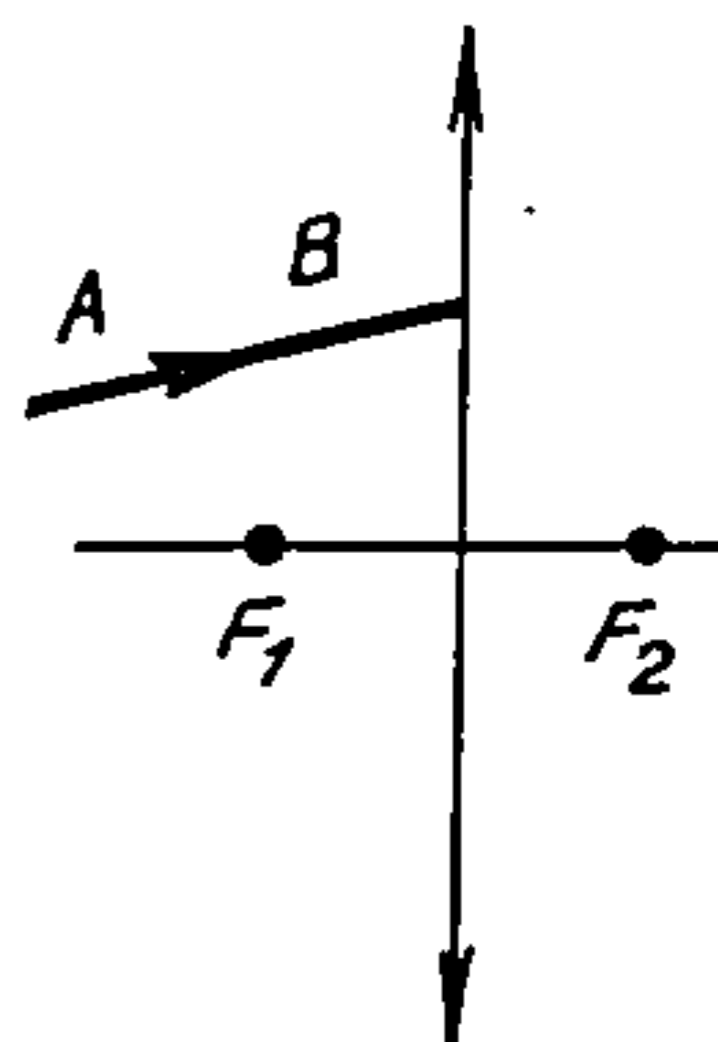
### Лінзы і аптычныя сістэмы

26.35. На рыс. 26.7 паказана тонкая збіральная лінза, якая знаходзіцца ў паветры;  $F_1$  і  $F_2$  — яе фокусы. Знайсці пабудовай ход адвольнага праменя  $AB$  пасля лінзы.

26.36. Пабудаваць відарыс прадмета  $AB$  у рассеивальной лінзе (рыс. 26.8).

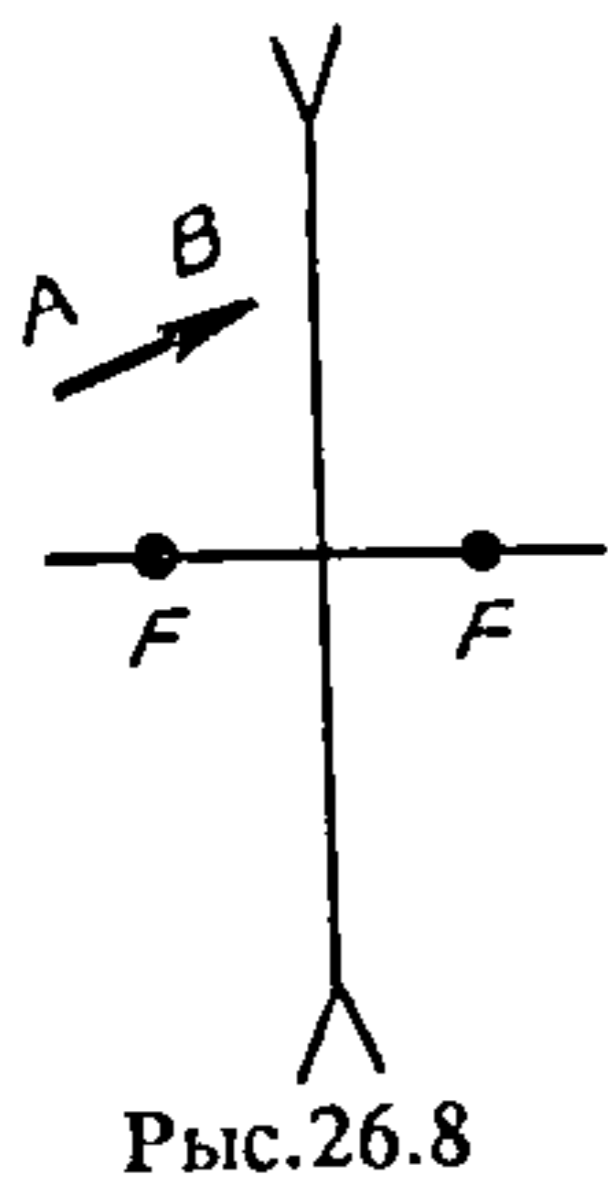
26.37. Ход праменя 1, які прайшоў праз рассеивальную лінзу, паказаны на рыс. 26.9. Як пойдзе прамень 2 пасля лінзы?

26.38. На рыс. 26.10 паказана становішча двух пунктаў —

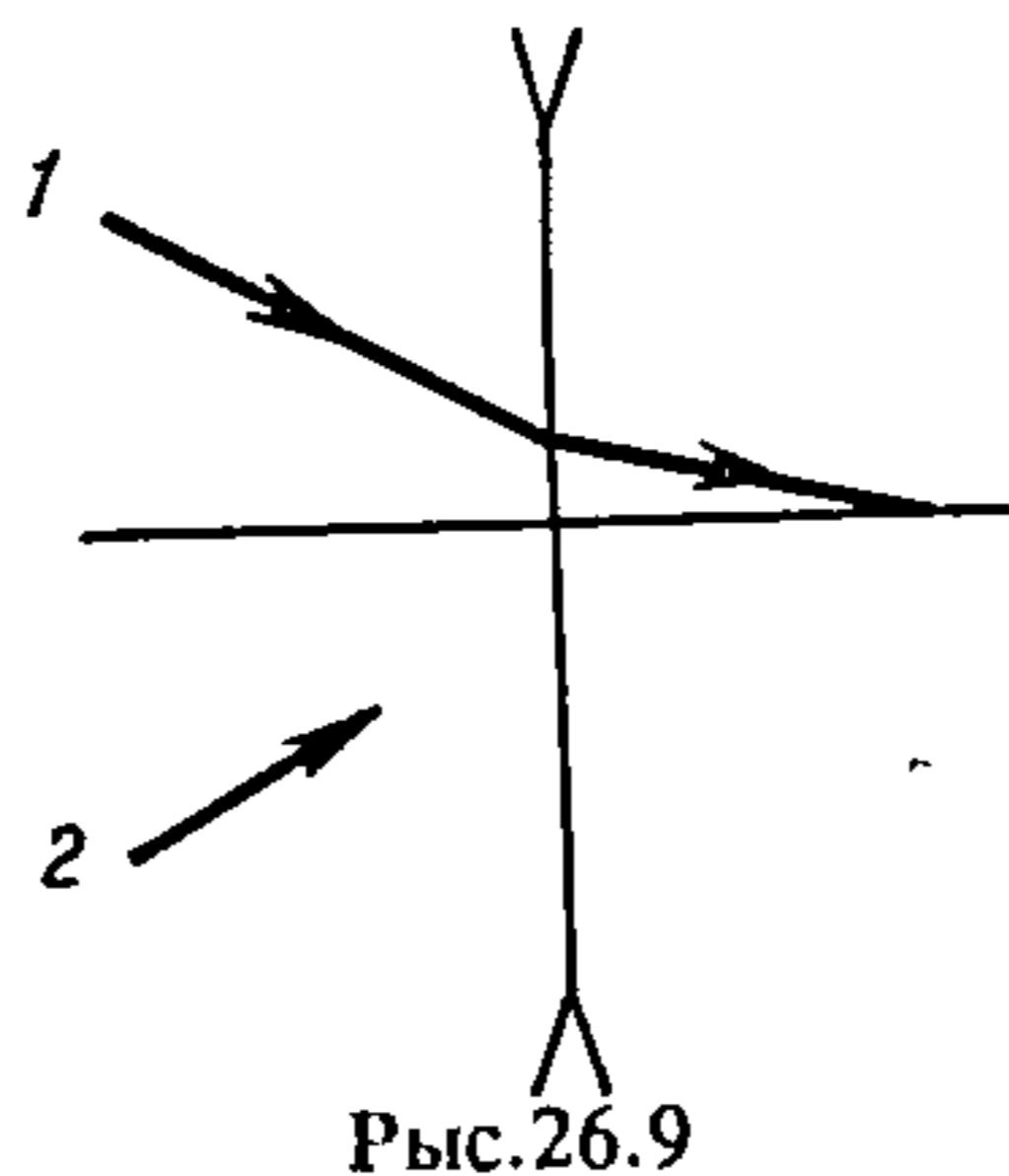


Рыс.26.7

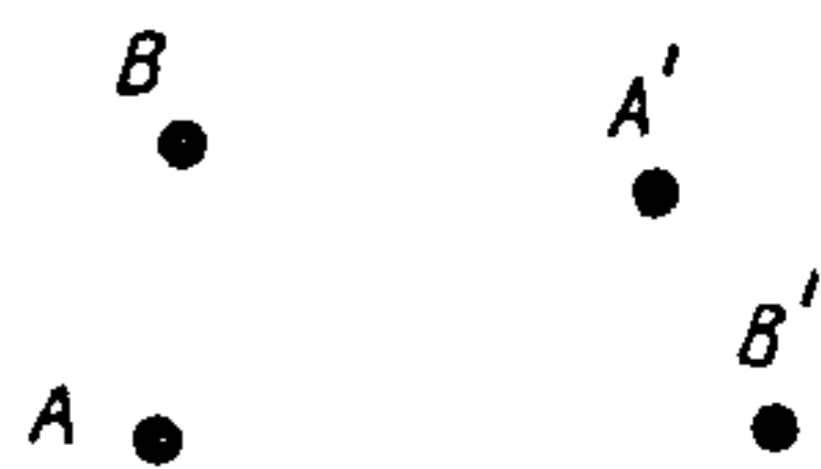




Рыс.26.8



Рыс.26.9



Рыс.26.10

$A$  і  $B$  іх відарысаў —  $A'$  і  $B'$ , якія дае тонкая лінза. Знайсці пабудовай становішча лінзы і яе фокусаў.

26.39. Знайсці адносіну аптычных сіл лінзаў, вырабленых са шкла і алмаза, з аднолькавымі радыусамі крывізны.

26.40. Даказаць, што найменшая адлегласць паміж прадметам і яго сапраўдным відарысам у збіральнай лінзе  $4F$ , дзе  $F$  — фокусная адлегласць лінзы.

26.41. Збіральная лінза дае рэзкі відарыс на экране пры двух становішчах лінзы, адлегласць паміж якімі  $k$ . Даказаць, што ў гэтым выпадку  $F = (l^2 - k^2) / 4l$ , дзе  $l$  — пастаянная адлегласць паміж прадметам і экранам.

26.42. Як, не вымяраючы фокусных адлегласцей збіральнай і рассеивальной лінзаў, параўнаць іх аптычныя сілы?

26.43. Як паставіць крыніцу святла адносна збіральнай лінзы і ўвагну-тага люстэрка, каб атрымаўся паралельны пучок прамянёў?

26.44. Дзе і якой велічыні атрымаецца відарыс прадмета вышынёй 2 см, які знаходзіцца на адлегласці 15 см ад збіральнай лінзы з фокуснай адлегласцю 0,1 м?

26.45. Знайсці фокусную адлегласць збіральнай лінзы, калі здабытак адлегласці ад прадмета да пярэдняга фокуса яе і адлегласці ад задняга фокуса да відарыса роўны  $l$ ?

26.46. Аптычная сіла шкляной лінзы ў паветры 5,5 дптр, а ў вадкасці — 1,63 дптр. Які паказчык праламлення вадкасці? Паказчык праламлення лінзы 1,5.

26.47. Фокусная адлегласць дваякавыпуклай шкляной лінзы ( $n = 1,5$ ), у якой радыусы крывізны паверхні аднолькавыя, роўная 25 см. Дзе збяруцца паралельная аптычнай восі прамяні, якія падаюць на лінзу, калі ззаду лінзы знаходзіцца вада?

26.48. Збіральная лінза з паказчыкам праламлення 1,5 дае сапраўдны відарыс на адлегласці 0,1 м ад яе. Калі прадмет і лінзу апускаюць у ваду, не мяняючы адлегласці паміж імі, то відарыс атрымліваецца на адлегласці 0,6 м ад лінзы. Знайсці фокусную адлегласць лінзы ў вадзе. Паказчык праламлення вады 1,33.

26.49. Збіральная лінза дае на экране відарыс прадмета. Паміж лінзай і

экранам паставілі плоскапаралельную пласцінку таўшчынёй 3 см і паказчыкам праламлення 1,5. У якім напрамку і на колькі трэба пераставіць экран, каб зноў атрымаць выразны відарыс прадмета?

26.50. Вышыня відарыса, атрыманага пры дапамозе збіральнай лінзы  $H_1$ . Не змяняючы адлегласці паміж прадметам і экранам, перасоўваннем лінзы атрымліваюць другі відарыс прадмета. Вышыня гэтага відарыса  $H_2$ . Знайсці сапраўдную вышыню прадмета.

26.51. Прадмет, які знаходзіцца на адлегласці  $d_1 = 21$  см ад збіраючай лінзы з фокуснай адлегласцю  $F = 20$  см, раўнамерна перамяшчаюць уздоўж аптычнай восі на адлегласць  $d_2 = 26$  см ад лінзы. Што больш, скорасць перамяшчэння відарыса альбо скорасць перамяшчэння прадмета? У колькі разоў?

26.52. Падоўжная хратычная аберацыя сіметрычнай збіральнай лінзы 0,022 м. Знайсці радыус крывізны лінзы, калі паказчык праламлення гэтага гатунку шкла для чырвоных прамянёў 1,57, а для фіялетавых — 1,60.

26.53. Як зменіцца фокусная адлегласць лінзы, калі яе раўнамерна нагрэць?

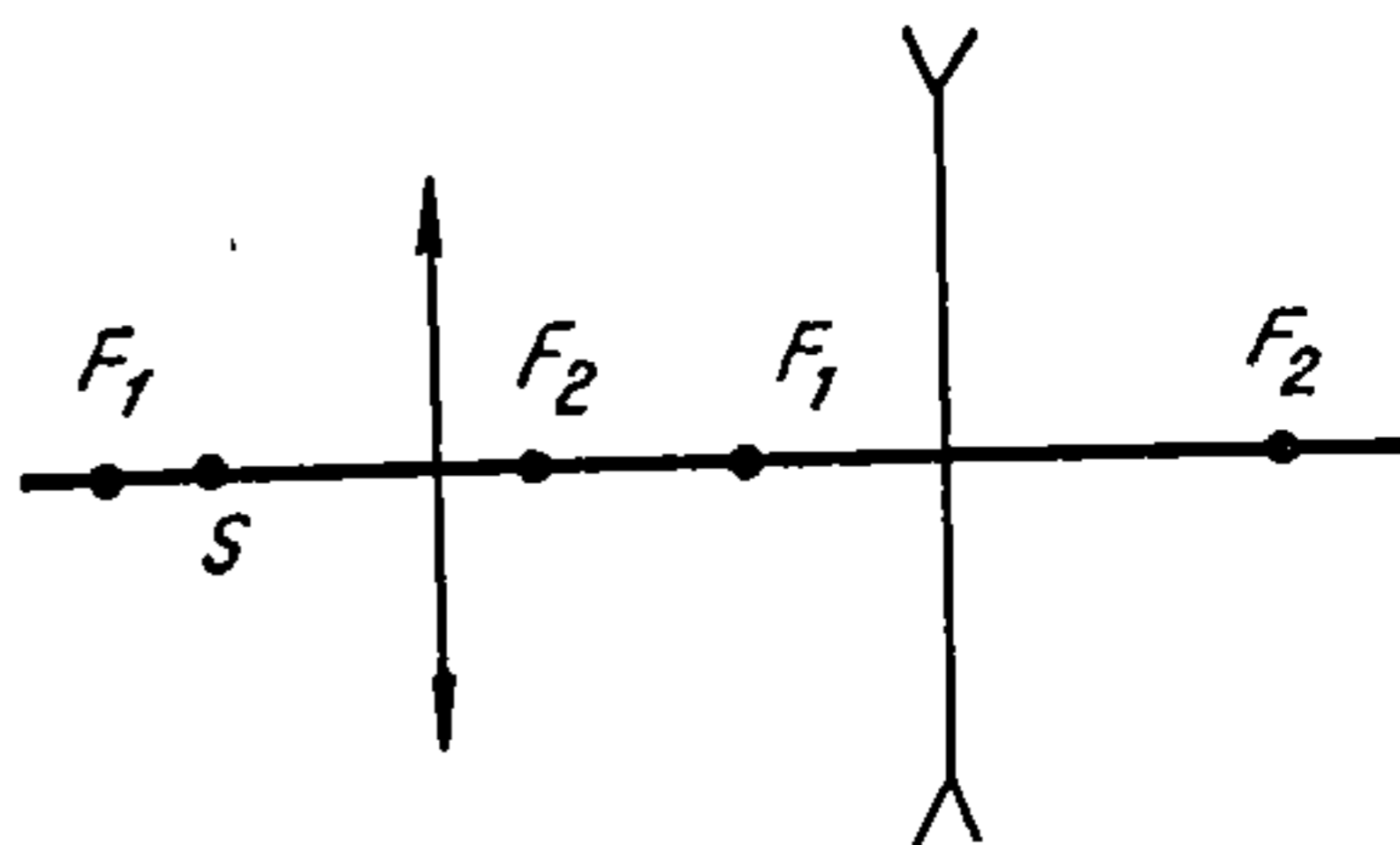
26.54. Як трэба паставіць збіральную і расейвальную лінзы, каб паралельныя прамяні, што праходзяць праз іх, засталіся паралельнымі? Ці заўсёды магчымае рашэнне гэтай задачы?

26.55. Пры дапамозе пабудовы знайсці відарыс светлавога пункта  $S$  (рыс. 26.11).

26.56. На плоскім люстры ляжыць лінза з фокуснай адлегласцю 40 см. Над лінзай на яе аптычнай восі, на вышыні  $h = 10$  см, знаходзіцца крыніца святла. Вызначыць месца відарыса.

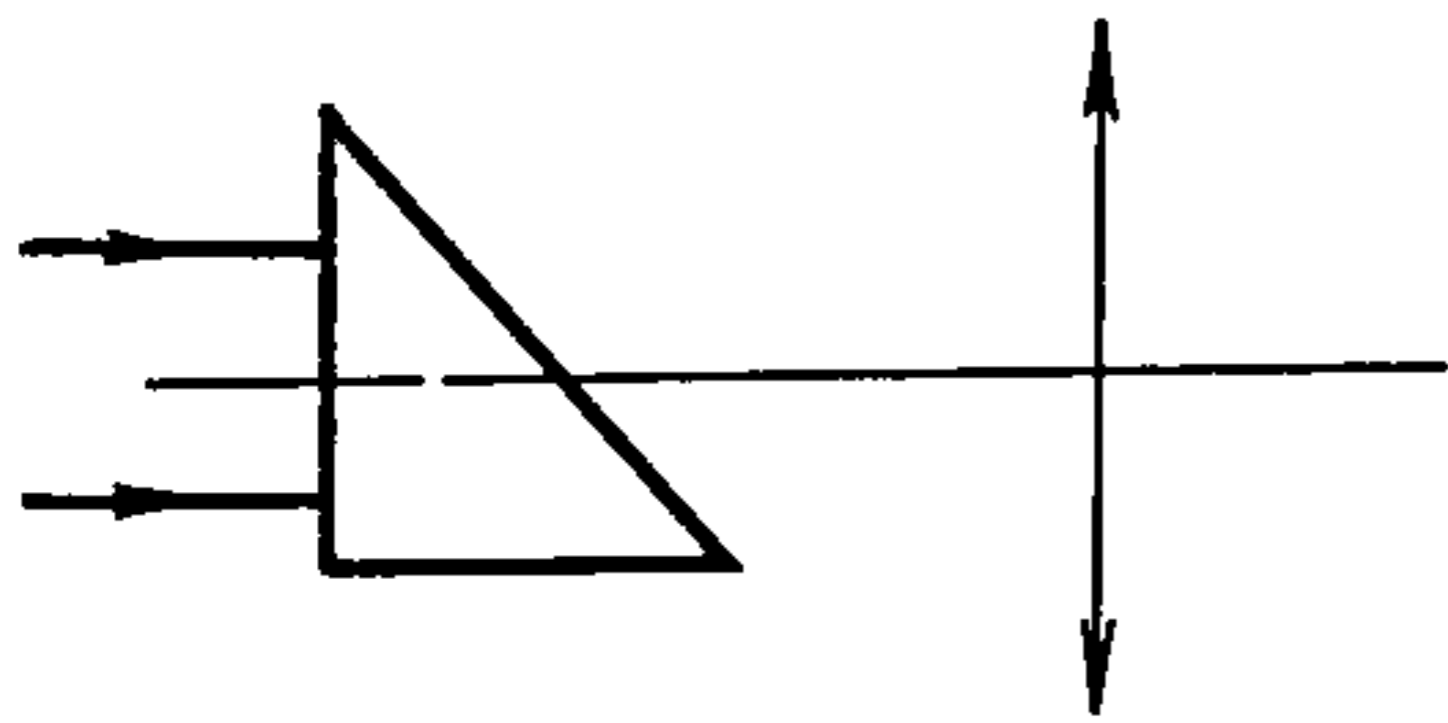
26.57. Выпраменьванне пары натрыю паралельным пучком падае на прызму з праламляльным вуглом  $60^\circ$ . Відарыс крыніцы ў выглядзе тонкіх спектральных ліній узнікае ў факальнай плоскасці лінзы з фокуснай адлегласцю 50 см. Вызначыць, на якой адлегласці адна ад другой знаходзяцца дзве жоўтыя спектральныя лініі, калі для адной з іх паказчык праламлення роўны 1,48810, а для другой — на  $10^{-5}$  большы. Прызма знаходзіцца ў становішчы найменшага адхілення.

26.58. На сталі знаходзіцца шкляная прызма з праламляльным вуглом  $\varphi = 45^\circ$  і паказчыкам праламлення  $n$  і тонкая лінза з фокуснай адлегласцю  $F$ . Галоўная аптычная вось лінзы перпендыкулярная вертыкальнай грані прызмы, на якую накіраваны гарызантальны паралельны пучок святла (рыс. 26.12). На якой адлегласці  $x$  ад галоўнай аптычнай восі знаходзіцца пункт, у якім сыходзяцца прамяні, што прайшлі праз прызму і лінзу?



Рыс. 26.11





Рыс.26.12

26.59. Дзве збіральныя лінзы з фокуснымі адлегласцямі  $F_1 = 12$  см і  $F_2 = 7$  см маюць агульную аптычную вось і знаходзяцца на адлегласці  $l$  адна ад другой. Прадмет даўжынёй 2 см змешчаны ў фокальнай плоскасці першай лінзы на адлегласці  $F_1 + l$  ад другой. Знайсці даўжыню відарыса.

26.60. Збіральная лінза з фокуснай адлегласцю 10 см і рассеивальная лінза з фокуснай адлегласцю 20 см, якія маюць агульную галоўную аптычную вось, знаходзяцца на адлегласці 30 см адна ад адной. На адлегласці 10 см ад рассеивальной лінзы з боку, процілеглага збіральнай лінзе, знаходзіцца прадмет. Вызначыць адлегласць паміж відарысам прадмета, створаным абедзвюма лінзамі, і збіральнай лінзай.

26.61. За збіральнай лінзай з фокуснай адлегласцю  $F$  перпендыкулярна аптычнай восі лінзы на адлегласці  $l$  ад яе паставілі плоскае люстэрка. Перад лінзай на адлегласці  $d$  знаходзіцца пунктавая крыніца святла  $S$ . Вызначыць становішча відарыса. Пры якіх значэннях  $d$  відарыс будзе сапраўдным і пры якіх уяўным?

26.62. Цыліндрычную пасудзіну, закрытую з абодвух канцоў, паставілі на нахіленую плоскасць, якая складае вугал  $\theta = 30^\circ$  з гарызонтам. У цыліндры знаходзіцца збіральная лінза з фокуснай адлегласцю  $F = 10$  см. Фокальная плоскасць лінзы супадае з верхнім тарцом цыліндра. У пасудзіну наліта вадкасць з паказчыкам праламлення  $n = \sqrt{3}$ . З пункта  $S$  на дне пасудзіны выходзіць вертыкальна прамень святла. На якую адлегласць перамесціцца след гэтага праменя, калі цыліндр будзе слізгаць без трэння па нахільнай плоскасці?

26.63. Са шкла з паказчыкам праламлення 1,5 зроблена тоўстая лінза. радыус яе першай выпуклай паверхні 20 см, радыус другой, якая можа быць як выпуклай, так і ўвагнутай, 5 см. Знайсці таўшчыню лінзы, калі паралельны пучок святла прайшоў праз лінзу і застаўся паралельным.

### Аптычныя прылады

26.64. Аптычная сіла акулераў  $+2,5$  дптр. Якія лінзы ў гэтых акулерах і які дэфект зроку яны выпраўляюць?

26.65. Чалавек пры чытанні трымае кнігу на адлегласці 50 см. Акулераў якой аптычнай сілы яму патрэбны?

26.66. На колькі зменіцца аптычная сіла нармальнага вока чалавека, калі ён пераводзіць позірк ад кнігі, якую чытаў, на малюнак, што вісіць на сцяне на адлегласці 2 м ад вока?

26.67. Аб'ектыў, зроблены з дзвюх лінзаў — збіральнай і рассеивальной, складзеных шчыльна, выкарыстоўваецца як лупа з павелічэннем у 4 разы. Вызначыць аптычную сілу кожнай з лінзаў, калі вядома, што аптычная сіла

збіральной лінзы ў 4 разы большая (па абсалютным значэнні) за аптычную сілу рассеивальной лінзы.

26.68. Якое павелічэнне можна атрымаць пры дапамозе праекцыйнага апарата, аб'екты якога мае фокусную адлегласць 40 см, калі адлегласць ад аб'ектыва да экрана 10 м?

26.69. Фокусная адлегласць аб'ектыва мікраскопа 3 мм. Прадмет знаходзіцца ад аб'ектыва на адлегласці 3,1 мм. Знайсці павелічэнне мікраскопа, калі фокусная адлегласць акуляра 5 см.

26.70. Як трэба паставіць аб'ектыў і акуляр мікраскопа, каб праз іх можна было ўбачыць зорку?

26.71. Фокусная адлегласць аб'ектыва і акуляра мікраскопа адпаведна 5 мм і 5 см. Прадмет знаходзіцца на адлегласці 0,1 мм ад галоўнага фокуса аб'ектыва. Знайсці даўжыню тубуса мікраскопа і яго павелічэнне для нармальнага вока.

26.72. Мікраскоп дае павелічэнне ў 640 разоў. Прадмет знаходзіцца на адлегласці 0,41 см ад аб'ектыва. Фокусная адлегласць аб'ектыва 0,4 см. Вызначыць фокусную адлегласць акуляра і даўжыню тубуса мікраскопа.

26.73. З якой адлегласці трэба фатаграфіраваць будынак даўжынёй 50 м, каб увесь яго фасад змясціўся на кадры плёнкі памерам 24x36 мм? Фокусная адлегласць аб'ектыва 500 мм.

26.74. Пры аэрафотаздымках выкарыстоўваюць фотаапарат, аб'ектыў якога мае фокусную адлегласць 8 см. Мінімальны памер распазнаных дэталей відарыса на фотаплёнцы  $10^2$  мм. На якой вышыні павінен ляцець самалёт, каб на фатаграфіі можна было распазнаць лісце дрэў памерам 5 см? Пры якой хуткасці самалёта відарыс не будзе размыты, калі час экспазіцыі  $10^{-3}$  с?

26.75. Глядзельная труба выкарыстоўваецца для назірання Месяца. Каб разгледзець прадметы, якія знаходзяцца на адлегласці 100 м, акуляр трэба перасунуць на 2,5 см. Вызначыць фокусную адлегласць аб'ектыва.

26.76. Месяц назіраецца простым вокам пад вуглом  $31'$ . Пад якім вуглом ён відаць у тэлескоп, калі фокусная адлегласць аб'ектыва 2 м, а фокусная адлегласць акуляра 0,1 м?

26.77. Тэлескоп, у якога акуляр мае фокусную адлегласць 50 мм, дае вуглавое павелічэнне ў 60 разоў. Якое вуглавое павелічэнне аднаго аб'ектыва, калі ўбраць акуляр, а сапраўдны відарыс, створаны аб'ектывам, разглядаць простым вокам з адлегласці найлепшага зроку?

26.78. Перад аб'ектывам глядзельнай трубы знаходзіцца рассеивальная лінза з фокуснай адлегласцю  $F_1 = -15$  см на адлегласці  $d = 85$  см ад крыніцы святла. Дзе ў прамежку паміж крыніцай і рассеивальной лінзай трэба паставіць збіральную лінзу з фокуснай адлегласцю  $F_2 = 16$  см, каб крыніца святла была рэзка відаць ў трубу, што пастаўлена на бясконцасць? Пры якім з магчымых становішчаў лінзы відарыс у трубе будзе мець найбольшыя вуглавыя памеры?



## § 27. ФОТАМЕТРЫЯ

Асветленасць  $E$  характарызуецца светлавым патокам, які падае на адзінку плошчы:

$$E = d\Phi / (dS).$$

Пунктавая ізатропная крыніца сілай святла  $I$  стварае на паверхні, якая знаходзіцца на адлегласці  $r$ , асветленасць

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \varphi,$$

дзе  $\varphi$  — вугал падзення прамянёў.

Свяцільнасць колькасна роўная светлавому патоку, які выпраменьвае адзінка паверхні цела, што свеціцца:

$$M = d\Phi / (dS).$$

Калі свяцільнасць цела абумоўлена яго асветленасцю, то

$$M = \rho E,$$

дзе  $\rho$  — каэфіцыент адбіцця.

Яркасць, колькасна роўная адносінам сілы святла з элемента выпраменьвальнай паверхні да плошчы праекцыі элемента на плоскасць, якая перпендыкулярна напрамку назірання, вызначаецца па формуле

$$L = dI / (dS \cos \theta),$$

дзе  $\theta$  — вугал паміж нармаллю да элемента паверхні і напрамкам назірання.

Калі яркасць не залежыць ад напрамку, свяцільнасць і яркасць звязаны суадносінай

$$M = \pi L.$$

27.1. У колькі разоў у Мінску асветленасць паверхні Зямлі 22 снежня меншая, чым 22 чэрвеня? Вышыня Сонца 22 чэрвеня  $59^\circ 37'$ , а 22 снежня  $12^\circ 43'$ .

27.2. Вызначыць поўны светлавы паток, які дае ізатропная пунктавая крыніца святла, калі на адлегласці 2,0 м ад яе асветленасць 15,0 лк.

27.3. Вызначыць светлавы паток, які паступае ў кандэнсар ліхтара ад пунктавай крыніцы святла сілай  $I = 1000$  кд, калі радыус кандэнсара  $r = 10$  см, а крыніца знаходзіцца на восі кандэнсара на адлегласці 40 см ад яго.

27.4. Пунктавая крыніца святла, якая знаходзіцца на адлегласці  $a$  ад плоскасці экрана, стварае ў цэнтры яго асветленасць  $E$ . Як зменіцца асветленасць у цэнтры экрана, калі па другі бок ад крыніцы на адлегласці  $a/2$  паставіць увагнутае люстэрка радыусам  $a$ ?

27.5. Ізатропная пунктавая крыніца сілай святла  $I = 100$  кд знаходзіцца ў цэнтры празрыстай шкляной сферы. Палову сферы пакрылі паўпразрыстай плёнкай з каэфіцыентам прапускання  $\eta = 0,25$ . Вызначыць светлавы паток, які выходзіць са сферы. На адбіццё святла ўвагі не звяртаць.

27.6. Над гарызантальнай паверхняй, асветленай пунктавай крыніцай сілай святла 60 кд, на шляху прамянёў паставілі збіральную лінзу так, што крыніца знаходзіцца ў яе фокусе. Вызначыць аптычную сілу лінзы, калі асветленасць паверхні пад крыніцай святла 15 лк.

27.7. Пунктавая крыніца святла, што асвятляе экран, знаходзіцца ў галоўным фокусе збіраючай лінзы, якую змясцілі паміж экранам і крыніцай. Знайсці асветленасць цэнтры экрана, калі сіла святла крыніцы

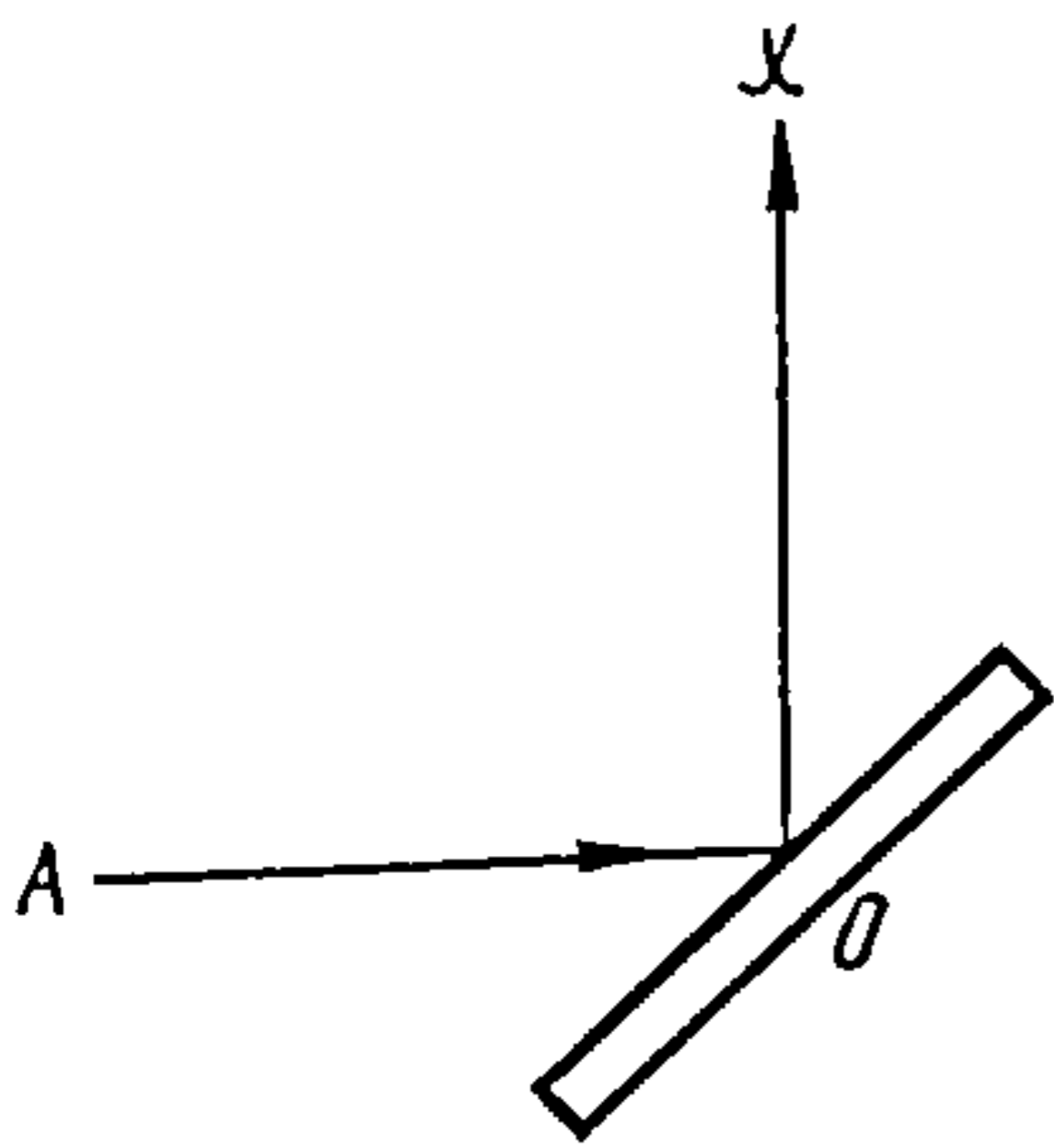


Рис.27.1

100 кд, а фокусная адлегласць лінзы 0,5 м.

27.8. Пучок святла падае на ідэальна расейваючы экран пад вуглом  $45^\circ$  да яго паверхні (рыс. 27.1). Як зменіцца светлавы паток, які расейвае экран у напрамку  $Ox$ , калі яго павярнуць па гадзіннікавай стрэлцы на  $15^\circ$  вакол восі, перпендыкулярнай плоскасці рысунка?

27.9. На адлегласці 1 м ад пунктавай крыніцы святла знаходзіцца экран. Каб павялічыць яго асветленасць, па другі бок ад крыніцы святла на той жа адлегласці паставілі плоскае люстэрка, што ідэальна адбівае святло на экран. Якую асветле-

насць стварае гэтая крыніца ў цэнтры экрана, калі яе сіла святла 5 кд?

27.10. Над цэнтрам квадратнай спартыўнай пляцоўкі на вышыні 5 м вісіць лампа. Вызначыць, на якой адлегласці ад цэнтры пляцоўкі асветленасць паверхні зямлі ў 2 разы меншая, чым у цэнтры. Лічыць, што сіла святла лампы ва ўсіх напрамках аднолькавая.

27.11. Відарыс прадмета атрымліваюць з дапамогай дваякавыпуклай лінзы. Як зменіцца яркасць відарыса, калі палову лінзы засланіць кардонам?

27.12. У колькі разоў асветленасць у месячную ноч у поўні меншая, чым у сонечны дзень? Вышыня Сонца і Месяца над гарызонтам аднолькавая. Лічыць, што асветленая паўсфера Месяца раўнамерна расейвае ўсё падаючае святло. Адлегласць ад Месяца да Зямлі лічыць роўнай 400 Мм, а радыус Месяца  $R_M = 2$  Мм.

27.13. Збіральная лінза дае відарыс прадмета натуральнага памеру. У колькі разоў паменшыцца асветленасць відарыса прадмета, калі шляхам перамяшчэння лінзы і прадмета павялічыць плошчу відарыса ў 9 разоў?

27.14. Знайсці асветленасць, якую стварае пражэктар на адлегласці 3 км, калі ён дае конусападобны пучок святла з цясным вуглом  $0,03$  ср. Магутнасць крыніцы святла пражэктара  $N = 200$  кВт і святлоаддача  $\eta = 50$  лм/Вт. На паглынне святла ўвагі не звяртаць.

27.15. Пры фатаграфаванні аб'екта, асветленага дзвюма лямпамі магутнасцю 150 Вт кожная на адлегласці 4 і 5 м ад яго, патрабуецца экспазіцыя 8 с. Якой павінна быць экспазіцыя пры фатаграфаванні таго ж аб'екта, асветленага адной такой лямпай, што знаходзіцца на адлегласці 3 м?

27.16. Прадмет фатаграфуюць з памяншэннем у 2 разы. Як зменіцца асветленасць фотаплёнкі, калі здымаць гэты прадмет у натуральную велічыню? Дыяметр аб'ектыва лічыць малым параўнальна з адлегласцю да прадмета і пры вызначэнні цяснага вугла плошчу лінзы прыняць роўнай плошчы адпаведнага шаравога сегмента.

27.17. Малюнак фатаграфуюць спачатку цалкам з вялікай адлегласці, а потым асобныя дэталі ў натуральную велічыню. У колькі разоў трэба



змяніць час экспазіцыі пры фатаграфаванні дэталяў?

27.18. Пры фатаграфаванні прадмета ў натуральную велічыню экспазіцыя роўная 2 с. Якой павінна быць экспазіцыя, калі прадмет фатаграфавець з павелічэннем у 5 разоў?

27.19. Астранамічная камера для фатаграфавання Сонца мае аб'ектыў з фокуснай адлегласцю 10 м. Перад аб'ектывам паставілі круглую дыяфрагму дыяметрам 5 см. Адчувальнасць фотаплёнкі 10 лк·с. Якім павінен быць пры гэтых умовах час экспазіцыі? Вядома, што прамыя сонечныя прамяні ўтвараюць на перпендыкулярнай ім пляцоўцы асветленасць  $E = 40$  клк. Вуглавы дыяметр Сонца роўны 0,01 рад.

27.20. Маленькі аб'ект фатаграфуюць у двух маштабах: з адлегласці  $3F$ , дзе  $F$  — фокусная адлегласць аб'ектыва, і з адлегласці  $5F$ . У колькі разоў трэба змяніць дыяметр дыяфрагмы аб'ектыва, каб асветленасць відарыса на плёнцы ў абодвух выпадках была аднолькавай? Лічыць, што дыяметр аб'ектыва многа меншы за яго фокусную адлегласць.

27.21. Пунктавая ізатропная крыніца святла, сіла святла якой  $I = 10$  кд, знаходзіцца на восі тонкай збіраючай лінзы ( $F = 12$  см) на адлегласці 18 см ад яе. Знайсці сілу святла відарыса крыніцы. Экран адсутнічае. Страты святла не ўлічваюць.

27.22. Вызначыць сілу святла лямпы, якая знаходзіцца ў сярэдзіне матавага плафона сферычнай формы, радыус якога 8 см. Яркасць такога святельніка  $4480$  кд/м<sup>2</sup>, каэфіцыент страт  $k = 0,1$ .

27.23. У лямпе з сілай святла 85 кд целам, якое свеціцца, з'яўляецца напалены шарык дыяметрам 3 мм. Знайсці яркасць паверхні лямпы, калі сферычная колба зроблена: а) з празрыстага шкла; б) з матавага шкла. Дыяметр колбы 6 см. На страты святла ў абалонцы колбы не звяртаць увагі.

27.24. Свеціцца дыск радыусам 8 см. Яго яркасць  $L = 4 \cdot 10^3$  кд/м<sup>2</sup> не залежыць ад напрамку. Вызначыць асветленасць у пункце, што знаходзіцца на адлегласці 20 см ад цэнтры дыска ў напрамку, нармальным да паверхні дыска. Якая памылка будзе зроблена, калі пры вылічэнні асветленасці дыск лічыць пунктавай крыніцай, сіла святла якой  $\pi L r^2$ ? Крыніца знаходзіцца ў цэнтры дыска радыусам  $r_1$ .

27.25. З дапамогай лінзы альбо ўвагнутага люстра можна сабраць сонечныя прамяні і атрымаць у месцы іх канцэнтрацыі дастаткова высокую тэмпературу. Як гэта выгадней зрабіць: з дапамогай ўвагнутага люстра дыяметрам  $D = 1$  м і радыусам крывізны  $R = 10$  м ці лінзы дыяметрам 2 см і фокуснай адлегласцю  $F_1 = 4$  см?

27.26. Працяглы нябесны аб'ект назіраюць спачатку няўзброеным вокам, а затым у тэлескоп. Як зменіцца пры гэтым асветленасць гэтага аб'екта на сятчатцы вока? Павелічэнне тэлескопа  $\Gamma$ , дыяметр яго аб'ектыва  $D$ , дыяметр зрэнкі  $d_0$ . Разглядаюцца два выпадкі: 1)  $\Gamma > D/d_0$ ; 2)  $\Gamma < D/d_0$ . На страты святла ўвагі не звяртаць.

## § 28. ПАЛЯРЫЗАЦЫЯ СВЯТЛА

Пры адбіцці натуральнага святла ад дыэлектрыка маюць месца формулы Фрэнеля:

$$I_{\perp} = 0,5 I_0 \left[ \frac{\sin(\alpha - \beta)}{\sin(\alpha + \beta)} \right]^2 ; \quad I_{\parallel} = 0,5 I_0 \left[ \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}(\alpha + \beta)} \right]^2 ,$$

дзе  $I_0$  — інтэнсіўнасць падаючага натуральнага святла;  $I_{\perp}$  — інтэнсіўнасць адбітага святла, у якога ваганні вектара напружання  $E$  светлавой хвалі перпендыкулярныя плоскасці падзення;  $I_{\parallel}$  — інтэнсіўнасць адбітага святла, у якога ваганні вектара напружання  $E$  светлавой хвалі паралельныя плоскасці падзення;  $\alpha$  — вугал падзення;  $\beta$  — вугал праламлення.

Кэфіцыент адбіцця дадзенай паверхні

$$R = \frac{(n - n_0)^2}{(n + n_0)^2} ,$$

дзе  $n$  — паказчык праламлення асяроддзя, ад паверхні якога гэтае святло адбіваецца;  $n_0$  — паказчык праламлення асяроддзя, у якім распаўсюджваецца святло.

Пры адбіцці святла ад дыэлектрыка поўная палярызацыя адбітага праменя надыходзіць пры ўмове (закон Брустэра)

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n ,$$

дзе  $\alpha_B$  — вугал падзення прамянёў;  $n$  — адносны паказчык праламлення.

Інтэнсіўнасць святла, якое прайшло праз палярызатар і аналізатар (закон Малюса),

$$I = I_0 \cos^2 \varphi ,$$

дзе  $\varphi$  — вугал паміж галоўнымі плоскасцямі палярызатара і аналізатара;  $I_0$  — інтэнсіўнасць святла, якое прайшло праз палярызатар. Вугал павароту плоскасці палярызацыі  $\varphi = \alpha l$ , дзе  $\alpha$  — пастаянная вярчэння, якая залежыць ад прыроды рэчыва і даўжыні светлавой хвалі;  $l$  — адлегласць, якую прайшоў светлавы прамень у рэчыве.

Для раствораў  $\varphi = \alpha' / C$ , дзе  $\alpha'$  — удзельнае вярчэнне;  $C$  — канцэнтрацыя рэчыва ў раствору.

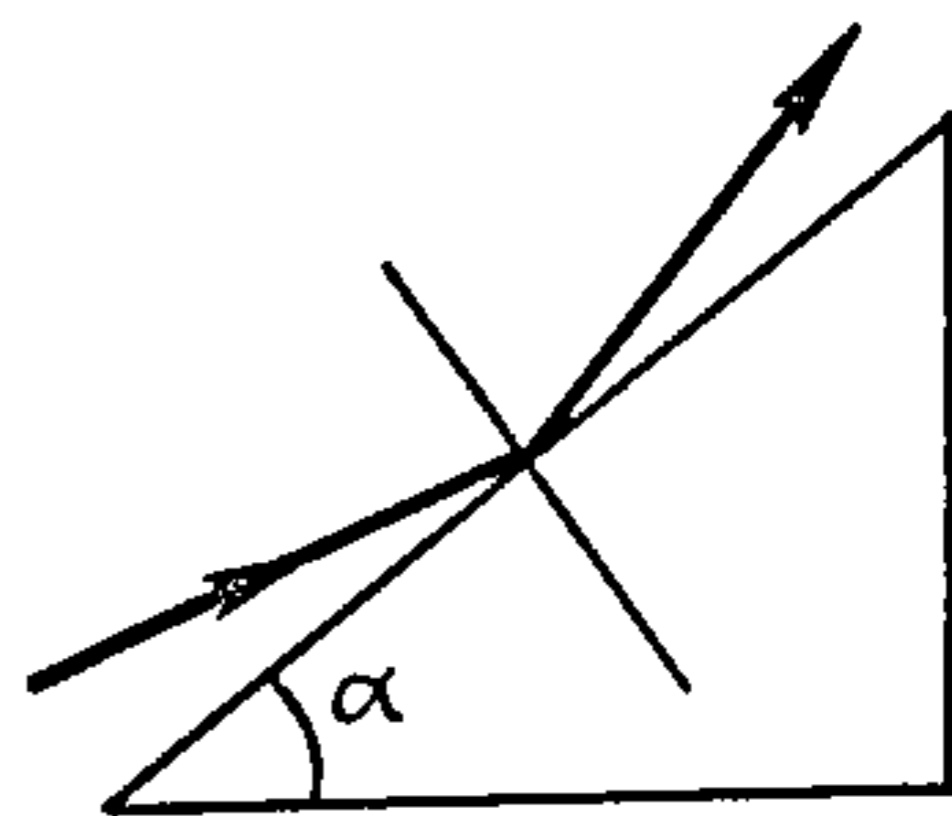
**28.1.** Чаму роўны вугал поўнай палярызацыі рэчыва, у якога вугал поўнага ўнутранага адбіцця  $42^\circ$  ?

**28.2.** Натуральны прамень падае на плоскапаралельную шкляную пласцінку. Вугал падзення роўны вуглу поўнай палярызацыі. Якую частку інтэнсіўнасці падаючага натуральнага святла складае пры гэтым інтэнсіўнасць адбітага праменя? Паказчык праламлення шкла 1,52.

**28.3.** Натуральны прамень падае на шкляную прызму. Вызначыць вугал паміж гранямі прызмы (рыс. 28.1), калі адбіты прамень максімальна палярызаваны.

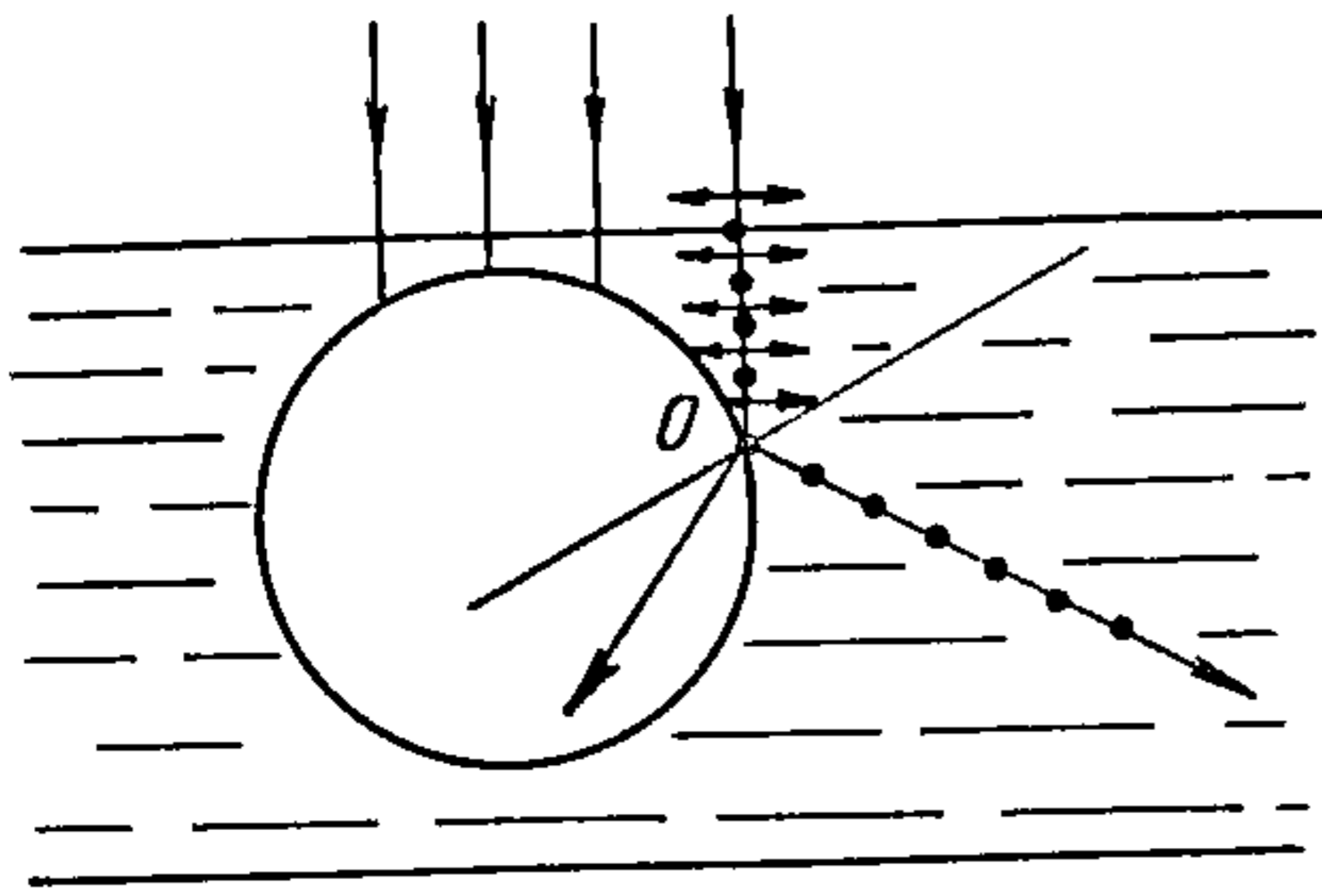
**28.4.** Прамень натуральнага святла адбіваецца ад плоскага дна пасудзіны, у якую наліта вада. Якім павінен быць вугал падзення праменя, каб адбіты прамень быў максімальна палярызаваны? Паказчык праламлення шкла 1,52, вады — 1,33.

**28.5.** Прамень святла падае на паверхню раствора, часткова адбіваецца, часткова праламляецца. Вызначыць паказчык праламлення раствора, калі



Рыс. 28.1





Рыс. 28.2

ў пункце  $O$  (рыс. 28.2). Паказчык праламлення шкла 1,58. Адбіты прамень поўнасьцю палярызаваны.

28.8. Часткова палярызаванае святло мае ступень палярызацыі  $P = 0,25$ . Знайсці адносіну інтэнсіўнасці палярызаванай складаючай свята да інтэнсіўнасці натуральнай.

28.9. На шляху пучка натуральнага свята паставілі паслядоўна дзве аднолькавыя палярызацыйныя прылады. Аказалася, што пры паралельных плоскасцях гэтая сістэма прапускае ў 10 разоў больш свята, чым пры скрыжаваных. Вызначыць ступень палярызацыі, якую стварае кожная прылада паасобку і ўся сістэма пры паралельных плоскасцях палярызацыі.

28.10. Аналізатар у 2 разы аслабляе інтэнсіўнасць палярызаванага свята, што падае на яго. Вызначыць вугал паміж галоўнымі плоскасцямі палярызатара і аналізатара. На страты свята пры адбіцці ўвагі не звяртаць.

28.11. Прамень натуральнага свята паслядоўна праходзіць праз палярызатар і аналізатар, вугал паміж галоўнымі плоскасцямі якіх  $60^\circ$ . Якая доля першапачатковага патоку зможа выйсці з аналізатара?

28.12. Вугал паміж галоўнымі плоскасцямі палярызатара і аналізатара  $45^\circ$ . У колькі разоў паменшыцца інтэнсіўнасць свята, якое выходзіць з аналізатара, калі вугал павялічыць да  $60^\circ$ ?

28.13. У колькі разоў аслабіцца натуральнае святло, што праходзіць праз два нікалі, галоўныя плоскасці якіх складаюць вугал  $63^\circ$ , калі ў кожным з іх губляецца 10 % падаючага свята?

28.14. Часткова палярызаванае святло назіраецца праз нікаль. Пры павароце нікаля на  $45^\circ$  адносна становішча максімальнай інтэнсіўнасці пучка, які выходзіць праз нікаль, інтэнсіўнасць свята памяншаецца ў 1,5 раза. Вызначыць адносіны інтэнсіўнасцей у натуральнай і палярызаванай частках падаючага пучка.

28.15. На шляху часткова палярызаванага свята, якое мае ступень палярызацыі  $P$ , паставілі нікаль спачатку ў становішча найбольшага прапускання, а потым яго павярнулі на вугал  $\varphi$ . Знайсці, як пры гэтым змянілася інтэнсіўнасць свята, што прайшло праз нікаль.

28.16. Часткова палярызаванае святло прапусцілі праз аналізатар. Пры

адбіты прамень поўнасьцю палярызуецца пры вугле праламлення  $35^\circ$ .

28.6. Вызначыць каэфіцыент адбіцця шкла, паказчык праламлення якога  $n = 1,5$ , пры ўмове, што натуральны прамень падае на яго паверхню пад вуглом Брустэра.

28.7. На шкляны шар, які знаходзіцца ў вадзе, падае пучок натуральнага свята. Вызначыць вугал  $\varphi$  паміж падаючым і адбітым праменьмі

гэтым інтэнсіўнасць праходзячага святла была максімальнай. Як зменіцца гэтая інтэнсіўнасць, калі галоўную плоскасць аналізатара павярнуць на вугал  $\alpha = 30^\circ$  ?

28.17. Натуральнае святло інтэнсіўнасцю  $I_0$  праходзіць праз два скрыжаваныя нікалі. Якой будзе інтэнсіўнасць святла, што выходзіць праз сістэму, калі паміж нікалямі паставіць трэці нікаль, галоўная плоскасць якога стварае вугал  $\alpha = 60^\circ$  з галоўнай плоскасцю першага нікаля? На страты святла ўвагі не звяртаць.

28.18. Натуральнае святло праходзіць праз два нікалі, вугал паміж галоўнымі плоскасцямі якіх  $\alpha$ , пападае на ідэальна адбіваючае люстра, затым зноў праходзіць праз тыя ж нікалі. Вызначыць утэнсіўнасць праходзячага святла, калі інтэнсіўнасць падаючага  $I_0$ . На страты святла ўвагі не звяртаць.

28.19. На шляху плоскапаралеляраванага праменя паставілі пласцінку кварцу, выразаную паралельна аптычнай восі крышталю. Якой таўшчыні павінна быць пласцінка, каб рознасць ходу паміж звычайным і незвычайным прамянямі складала  $1/4$  даўжыні хвалі жоўтага святла ( $\lambda = 589$  нм)? Максімальны паказчык праламлення незвычайнага праменя дадзенай даўжыні хвалі 1,553, а звычайнага — 1,543.

28.20. Плоскапаралельная пласцінка ў  $1/4$  хвалі выразана з кварцу і мае таўшчыню 16 мкм. На яе падае монахраматычнае святло з даўжынёй хвалі 589 нм. Вызначыць паказчык праламлення незвычайнага праменя, калі паказчык праламлення звычайнага 1,544.

28.21. Паказчыкі праламлення кварцу для святла з даўжынёй хвалі 0,4829 мкм роўныя  $n_e = 1,553$ ,  $n_o = 1,542$ . Якую таўшчыню павінна мець пласцінка ў  $1/4$  хвалі, выразаная з кварцу ўздоўж яго аптычнай восі?

28.22. Вызначыць таўшчыню кварцавай пласцінкі, для якой вугал павероту плоскасці палярызацыі святла з даўжынёй хвалі 490 нм роўны  $150^\circ$ . Пастаянная вярчэння кварцу для гэтай даўжыні хвалі  $26,3^\circ / \text{мм}$ .

28.23. Паміж двума паралельнымі нікалямі паставілі кварцавую пласцінку таўшчынёй 1 мм, выразаную паралельна аптычнай восі. Пры гэтым плоскасць палярызацыі монахраматычнага святла, што падае на палярызатар, павярнулася на вугал  $20^\circ$ . Пры якой мінімальнай таўшчыні пласцінкі святло не пройдзе праз аналізатар?

28.24. Натуральнае монахраматычнае святло падае на сістэму з двух скрыжаваных нікаляў. Паміж імі паставілі пласцінку кварцу, выразаную перпендыкулярна аптычнай восі. Якой павінна быць мінімальная таўшчыня пласцінкі, калі выходзячы прамень аслаблены ў  $n$  разоў? Пастаянная вярчэння кварцу  $\alpha$ .

28.25. Паміж двума скрыжаванымі нікалямі паставілі кварцавы клін з праламляючым вуглом  $3,5^\circ$ . Аптычная вось кліна паралельная яго востраму вуглу і складае вугал  $45^\circ$  з галоўнымі плоскасцямі нікаляў. Пры праходжанні праз гэту сістэму святла з даўжынёй хвалі  $\lambda = 550$  мкм назіраецца



сукупнасць інтэрферэнцыйных палос. Шырыня паласы  $\Delta x = 1,0$  мм. Вызначыць рознасць паказчыкаў праламлення кварцу незвычайнага і звычайнага прамянёў.

28.26. Вызначыць канцэнтрацыю раствору цукру, калі ўдзельнае вярчэнне яго для жоўтых прамянёў натрыю  $66,7 \cdot 10^{-2}$  град/ (м<sup>2</sup>·кг).

28.27. Калі раствор цукру, канцэнтрацыя якога  $0,3$  г/см<sup>3</sup>, налілі ў шкляную трубку, плоскасаць палярызацыі монахраматычнага святла павярнулася на  $25^\circ$ . Вызначыць канцэнтрацыю раствору ў другой трубцы, калі ў гэтым выпадку плоскасаць палярызацыі паварочваецца на  $20^\circ$ .

28.28. Паміж скрыжаванымі нікалямі палярыметра паставілі трубку з цукровым раствором. Поле зроку пры гэтым зрабілася максімальна светлым. Вызначыць даўжыню трубки, калі канцэнтрацыя цукру  $270$  кг/м<sup>3</sup>, а яго ўдзельнае вярчэнне  $66,5^\circ$  /дм пры канцэнтрацыі  $100$  кг/м<sup>3</sup>.

## § 29. ДЫСПЕРСІЯ І ПАГЛЫНАННЕ СВЯТЛА. РАСЕЙВАННЕ СВЯТЛА

Інтенсіўнасць святла, якое выходзіць са слою рэчыва таўшчынёй  $l$  пасля паглынання (закон Бугера),

$$I = I_0 e^{-kl},$$

дзе  $I_0$  — интенсіўнасць святла, якое падае на паглынальны слой;  $k$  — каэфіцыент паглынання.

У выпадку паглынання святла ў растворах дзейнічае закон Бугера—Ламберта:

$$I = I_0 e^{-k_1 c l},$$

дзе  $k_1$  — каэфіцыент паглынання на адзінку канцэнтрацыі рэчыва;  $c$  — канцэнтрацыя раствора рэчыва.

Аптычная шчыльнасць раствору

$$D = \lg\left(\frac{1}{T}\right) = \lg\left(\frac{I_0}{I_1}\right).$$

Памяншэнне интенсіўнасці святла з прычыны расейвання

$$I_l = I_0 e^{-k' l},$$

дзе  $k'$  — каэфіцыент расейвання.

Сумеснае дзеянне паглынання і расейвання святла змяняе интенсіўнасць па закону

$$I_l = I_0 e^{-\mu l},$$

дзе  $\mu = k + k'$ .

Інтенсіўнасць святла, якое расейваецца рэчывам, залежыць ад даўжыні хвалі (закон Рэлея):

$$I = \mu \frac{1}{\lambda^4},$$

дзе  $\mu$  — пастаянная расейвання;  $\lambda$  — даўжыня хвалі падаючага святла.

У выпраменьванні Вавілава—Чаранкова вугал паміж напрамкам выпраменьвання і вектарам скорасці часцінкі

$$\cos \theta = c / (nv),$$

дзе  $c$  — скорасць святла у вакууме;  $n$  — паказчык праламлення асяроддзя;  $v$  — скорасць зараджанай часцінкі.

29.1. Вызначыць дысперсію рэчыва, фазавую і групавую скорасці, калі вядома, што паказчык праламлення празрыстага рэчыва для малых інтэрвалаў даўжынь хваль залежыць ад даўжыні хвалі наступным чынам:  $n = A + B/\lambda^2$ .

29.2. Вызначыць групавую скорасць святла ў серавугляродзе. Паказчык праламлення серавугляроду для даўжыні хвалі  $\lambda = 0,527$  мкм складае  $n = 1,64$ , а  $dn/d\lambda = -0,218$  мкм<sup>-1</sup>.

29.3. Паказчык праламлення вады пры  $\lambda = 441$  нм роўны  $n_1 = 1,341$ , а пры  $\lambda_2 = 589$  нм  $n_2 = 1,334$ . Вызначыць сярэднія значэнні фазавай і групавой скорасцей святла ў вадзе для сіняй вобласці спектра (сярэдняя паміж  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ ).

29.4. Вызначыць групавую скорасць электрамагнітных хваляў у іонасферы. Фазавая скорасць  $v = \sqrt{c^2 + b^2 \lambda^2}$ , дзе  $c$  — скорасць святла ў вакууме;  $b$  — пастаянная;  $\lambda$  — даўжыня хвалі.

29.5. Вызначыць таўшчыню слоя рэчыва з каэфіцыентам паглынання  $k$ , калі монахраматычнае святло пры праходжанні праз яго аслабляецца ў 10 разоў.

29.6. Празрыстая пласцінка прапускае палову светлавога патоку, які падае на яе. Вызначыць каэфіцыент паглынання, калі таўшчыня пласцінкі  $l = 4,2$  см. На расейванне ўвагі не звяртаць. Лічыць, што 10 % патока, які падае, адбіваецца ад паверхні пласцінкі.

29.7. Таўшчыня шкла ў цяпліцы 2 мм. Каэфіцыент паглынання шкла для інфрачырвонай вобласці спектра  $0,62$  см<sup>-1</sup>. Якая доля энергіі даходзіць да раслін?

29.8. Пласцінка таўшчынёй  $d_1 = 3,8$  мм прапускае  $D_1 = 0,84$  светлавога патоку, які падае на яе. Другая пласцінка з таго ж рэчыва таўшчынёй  $d_2 = 9,0$  мм прапускае  $D_2 = 0,70$  таго ж светлавога патоку. Знайсці каэфіцыент паглынання гэтага рэчыва. Святло падае нармальна.

29.9. Каэфіцыент паглынання вады для выпраменьвання з даўжынёй хвалі  $0,77$  мк роўны  $0,0024$  мм<sup>-1</sup>. На якой глыбіні монахраматычны пучок будзе аслаблены ў 2,7 раза? На колькі неабходна павялічыць яркасць пучка, які падае, калі патрабуецца змяніць таўшчыню слоя вады з 1 да 5 см, не памяншаючы яркасці выпраменьвання з вадзянога фільтра?

29.10. Пры праходжанні праз пласцінку святло з даўжынёй хвалі  $\lambda_1$  аслабляецца ў выніку паглынання ў  $N_1$  разоў, а святло з даўжынёй хвалі  $\lambda_2$  — у  $N_2$  разоў. Вызначыць каэфіцыент паглынання для святла з даўжынёй хвалі  $\lambda_2$ , калі каэфіцыент паглынання для святла  $\lambda_1$  роўны  $k_1$ .

29.11. У 4 %-м раствору рэчыва ў празрыстым растваральніку інтэнсіўнасць святла на глыбіні  $l_1 = 20$  см аслабляецца ў 2 разы. У колькі разоў аслабляецца інтэнсіўнасць святла на глыбіні  $l_2 = 30$  мм у 8 %-м раствору таго ж рэчыва?

29.12. Якая канцэнтрацыя даследуемага раствору, калі аднолькавая ас-



ветленасць фотаметрычных палёў была атрымана ў эталонным 3 %-м раствору пры таўшчыні 8 мм, а ў даследуемым пры таўшчыні 24 мм?

29.13. Пры праходжанні святла праз слой раствору паглынаецца  $1/3$  першапачатковай светлавой энергіі. Вызначыць каэфіцыент прапускання.

29.14. Якая аптычная шчыльнасць раствору, калі каэфіцыент прапускання  $\tau = 0,3$ ?

29.15. Монахраматычнае святло праходзіць праз слой рэчыва таўшчыняй  $l = 15$  см. Пры гэтым яго інтэнсіўнасць змяншаецца ў 4 разы. Вызначыць каэфіцыент рассеявання, калі каэфіцыент паглынання  $0,025 \text{ см}^{-1}$ .

29.16. У колькі разоў інтэнсіўнасць малекулярнага рассеявання сіняга святла ( $\lambda = 460$  нм) большая, чым інтэнсіўнасць рассеявання чырвонага святла ( $\lambda = 650$  нм)?

29.17. Якую найменшую скорасць павінен мець электрон, каб у рэчыве з паказчыкам праламлення  $n = 1,60$  узнікла выпраменьванне Вавілава—Чаранкова?

29.18. Які павінен быць мінімальны імпульс электрона, каб выпраменьванне Вавілава—Чаранкова можна было назіраць у вадзе?

29.19. Вызначыць вугал паміж выпраменьваннем Вавілава—Чаранкова і напрамкам скорасці электрона ў вадзе. Кінетычная энергія электрона  $0,51$  МэВ.

29.20. Выпраменьванне Вавілава—Чаранкова назіраецца ў бензоле. Вызначыць скорасць электрона і скорасць святла ў бензоле, калі вугал паміж напрамкам выпраменьвання і напрамкам скорасці электрона  $38^\circ 30'$ . Паказчык праламлення бензолу  $1,50$ .

## § 30. РЭЛЯТЫВІСЦКІЯ ЭФЕКТЫ У ОПТЫЦЫ

Эфект Доплера ў рэлятывісцкім выпадку:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cos \theta},$$

дзе  $\nu$  — частата электрамагнітнага выпраменьвання, якую ўспрымае назіральнік;  $\nu_0$  — уласная частата выпраменьвання нерухомай крыніцы;  $\beta = v/c$ ;  $v$  — скорасць крыніцы адносна назіральніка;  $c$  — скорасць электрамагнітнага выпраменьвання ў вакууме;  $\theta$  — вугал паміж напрамкам скорасці  $v$  і напрамкам назірання ў сістэме, звязанай з назіральнікам.

Пры аддаленні крыніцы ад назіральніка ( $\theta = 0$ )

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}.$$

Пры збліжэнні крыніцы і назіральніка ( $\theta = \pi$ )

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}.$$

30.1. У доследзе Фізо па вызначэнні скорасці святла адлегласць ад зубчатага кола да люстэрка складала  $10$  км. Паслядоўныя знікненні святла назі-

раліся пры скорасцях вярчэння кола 52 і 72,8 аб/с. Вызначыць скорасць святла, калі колькасць зубцоў кола 720.

30.2. У доследзе, аднолькавым з тым, з дапамогай якога Фізо вызначаў каэфіцыент уцягнення сусветнага эфіру вадой, сумарны шлях святла ў вадзе  $2l = 2,00$  м. Даўжыня хвалі святла  $\lambda = 600$  нм. Вызначыць колькасць палос  $\Delta N$ , на якую змесціцца інтэрферэнцыйная карціна, калі вада пачне рухацца са скорасцю  $v = 6,00$  м/с. Паказчык праламлення вады  $n = 1,33$ .

30.3. Якой павінна быць максімальная скорасць крыніцы выпраменьвання, каб пры даследаванні ефекту Доплера можна было выкарыстаць формулу  $\nu = \nu_0 (1 - v/c)$ ? Хібнасць вызначэння частаты павінна быць не большая, чым 1 %.

30.4. Касмічны карабель рухаецца ад Зямлі са скорасцю 10 км/с. Вызначыць змяненне частаты  $\Delta \nu$ , якую рэгіструе прыёмнік, калі антэна карабля выпраменьвае частату  $\nu = 30$  МГц.

30.5. У бачнай частцы спектра выпраменьвання вадароду найбольш кароткая даўжыня хвалі  $\lambda_1 = 410$  нм. З якой скорасцю аддаляецца ад нас воблака вадароду, калі гэтае выпраменьванне яго, дзякуючы эффекту Доплера, апынулася ў інфрачырвонай вобласці? Мяжа бачнай вобласці  $\lambda_2 = 760$  нм.

30.6. Прыёмнік рэгіструе выпраменьванне, якое пасылае самалёт, што ляціць прама на назіральніка, а затым аддаляецца ад яго. Вызначыць скорасць самалёта, калі лічыць яе пастаяннай. Частата, якую выпраменьвае самалёт, таксама пастаянная і роўная  $\nu$ .

30.7. Туманнасць аддаляецца ад Сонечнай сістэмы са скорасцю  $v = (1/3)c$ . На якую адлегласць перамяшчаецца да чырвонага канца яе спектра лінія вадароду з даўжынёй хвалі  $\lambda = 434$  нм?

30.8. Крыніца монахраматычнага выпраменьвання рухаецца са скорасцю  $v = 0,1c$  у напрамку да назіральніка. Спектральная прылада назіральніка рэгіструе выпраменьванне гэтай крыніцы  $\lambda = 0,542$  мкм. Якая даўжыня хвалі выпраменьвання крыніцы?

30.9. Вывучаецца спектр зоркі, якая знаходзіцца ў плоскасці зямной арбіты. На колькі будуць адрознівацца ў спектры зоркі два вымярэнні даўжынні хвалі лініі  $\lambda = 0,4227$  мкм, калі першае зроблена пры руху Зямлі ў напрамку да зоркі, а другое — праз паўгода, калі напрамак руху Зямлі па арбіце зменіцца на процілеглы?

30.10. Знайсці адноснае змяненне даўжынні хвалі крыніцы ( $\Delta\lambda/\lambda$ ), калі яна рухаецца са скорасцю  $v$  у асяроддзі з паказчыкам праламлення  $n$ .

30.11. Для эксперыментальнай праверкі ефекта Доплера А. Белапольскі скарыстаў метада адбіцця святла ад люстэрак, якія хутка вярцеліся ў процілеглых напрамках. Вызначыць змяненне  $\Delta\lambda$  даўжынні хвалі святла, якое падае на люстэрака нармальна, калі монахраматычнае святло з даўжынёй хвалі  $\lambda$   $n$  разоў адбіваецца перад тым, як трапляе ў спектрограф. Лінейная скорасць люстэрак  $v$ .

30.12. Даўжыня хвалі лініі  $H_\alpha$  у спектры Сонца роўная  $\lambda = 656$  нм.



Вымярэнне гэтай даўжыні хвалі, якая праходзіць ад дыяметральна процілеглых краёў сонечнага дыска, выявіла розніцу на  $\Delta\lambda = 0,0088$  нм. Знайсці перыяд  $T$  вярчэння Сонца вакол уласнай восі.

30.13. Тэмпература атамарнага вадароду 300 К. Якім будзе пашырэнне спектральных ліній выпраменьвання вадароду ( $\Delta\lambda/\lambda$ ), абумоўленае эфектам Доплера?

30.14. Прыёмнік радыёлакацыйнай устаноўкі вызначае скорасць па розніцы частотаў паміж сігналам, што пасылае локатар, і частотой сігналу, адбітага ад аб'екта, які рухаецца. Вызначыць скорасць аб'екта, што набліжаецца, калі локатар працуе на хвалі  $\lambda = 0,5$  м, а розніца частотаў складае  $\Delta\nu = 4$  кГц.

## Раздзел V

### КВАНТАВАЯ ФІЗІКА

#### § 31. КВАНТАВЫЯ УЛАСЦІВАСЦІ ВЫПРАМЕНЬВАННЯ

Энергія фатона

$$E = h\nu = \hbar\omega,$$

дзе  $h$  — пастаянная Планка;  $\hbar = h/(2\pi) = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с;  $\nu$  — частата святла;  $\omega$  — кругавая частата.

Рэлятывісцкія маса і імпульс фатона:

$$m = E/c^2; \quad p = h\nu/c.$$

Ураўненне Эйнштэйна для знешняга фотаэфекту

$$h\nu = A + E_{k_{\max}}, \quad \text{або} \quad \hbar\omega = A + E_{k_{\max}},$$

дзе  $A$  — работа выхаду электрона.

Максімальная кінетычная энергія фотаэлектронаў выражаецца класічнай формулай

$$E_{k_{\max}} = \frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2,$$

дзе  $m_0$  — маса спакою электрона,

або рэлятывісцкай формулай ( $h\nu = \hbar\omega \gg 5$  кэВ):

$$E_{k_{\max}} = (m - m_0)c^2 = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right),$$

дзе  $\beta = v_{\max}/c$ ;  $m$  — маса рэлятывісцкага электрона.

Ціск святла пры нармальным падзенні

$$p = \frac{I}{c} (1 + \rho),$$

дзе  $I$  — паверхневая шчыльнасць патоку;  $\rho$  — каэфіцыент адлюстравання святла.

Кароткахвалевае мяжа  $\lambda_{\min}$  суцэльнага рэнтгенаўскага спектра

$$\lambda_{\min} = \frac{2\pi\hbar c}{e\Delta\varphi},$$

дзе  $e$  — зарад электрона;  $\Delta\varphi$  — рознасць патэнцыялаў, прыкладзеная да рэнтгенаўскай трубкі.

Закон Мозлі:

у агульным выпадку

$$\omega = CR^*(Z - \sigma)^2,$$

дзе  $\omega$  — кругавая частата ліній рэнтгенаўскага спектра;  $C$  — пастаянная;  $R^* = 2\pi cR$  ( $R^* = 2,07 \cdot 10^{16}$  с<sup>-1</sup>);  $c$  — скорасць святла;  $R$  — пастаянная Рыдберга;  $Z$  — атамны нумар элемента, які выпраменьвае гэты спектр;  $\sigma$  — пастаянная экраніравання;

для  $K_\alpha$ -ліній ( $\sigma = 1$ ,  $C = 3/4$ )

$$\omega_{K_\alpha} = \frac{3}{4} R^* (Z - 1)^2,$$



або

$$\frac{1}{\lambda_{K\alpha}} = \frac{3}{4} R (Z - 1)^2,$$

дзе  $1/\lambda = \omega/(2\pi c)$  — хвалева лік.

Энергія фатона  $K\alpha$ -ліній рэнтгенаўскага выпраменьвання

$$E_{K\alpha} = \frac{3}{4} E_i (Z - 1)^2,$$

дзе  $E_i = 2\pi\hbar R = 13,6$  эВ — энергія іанізацыі атама вадароду.

Эфект Комптана

$$\Delta\lambda = 2\lambda_c \sin^2 \varphi / 2,$$

дзе  $\lambda_c = h/(m_e c)$  — комптанаўская даўжыня хвалі;  $m_e$  — маса электрона аддачы;  $\varphi$  — вугал рассеявання.

Інтэнсіўнасць пучка рэнтгенаўскіх хваляў пры праходжанні іх праз паглынальнае рэчыва

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

дзе  $I_0$  — інтэнсіўнасць рэнтгенаўскіх хваляў, якія падаюць на паверхню рэчыва;  $\mu = \rho\mu_M$  — лінейны каэфіцыент паглынання;  $\rho$  — шчыльнасць рэчыва;  $\mu_M$  — масавы каэфіцыент паглынання.

Энергетычная свядцільнасць абсалютна чорнага цела (закон Стэфана—Больцмана)

$$R_{\Sigma} = \sigma T^4,$$

дзе  $\sigma$  — пастаянная Стэфана—Больцмана;  $T$  — тэрмадынамічная тэмпература абсалютна чорнага цела.

Энергетычная свядцільнасць шэрага цела

$$R_{\Sigma} = a\sigma T^4,$$

дзе  $a$  — каэфіцыент цеплавога выпраменьвання (ступень чарнаты) шэрага цела.

Закон перамяшчэння Віна:

$$\lambda_{\max} = b/T,$$

дзе  $b = 2,90 \cdot 10^{-3}$  м·К — пастаянная Віна.

Формула Планка:

$$f(\nu, T) = \frac{2\pi\hbar c^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp[\hbar c / (\lambda kT)] - 1}$$

або

$$f(\omega, T) = \frac{\hbar\omega^2}{4\pi^2 c^2} \frac{1}{\exp[\hbar\omega / (kT)] - 1},$$

дзе  $f(\nu, T)$ ,  $f(\omega, T)$  — спектральныя шчыльнасці выпраменьвання абсалютна чорнага цела.

Максімальная выпраменьвальная здольнасць абсалютна чорнага цела

$$\varphi \lambda_{\max} = CT^4,$$

дзе  $C = 1,30 \cdot 10^{-5}$  Вт/(м<sup>3</sup>·К<sup>5</sup>).

## Энергія, імпульс і маса фатона

31.1. Знайсці энергію фатона: 1) чырвонага ( $\lambda = 0,7$  мкм); 2) зялёнага ( $\lambda = 0,55$  мкм); 3) фіялетавага ( $\lambda = 0,4$  мкм); 4) інфрачырвонага ( $\lambda = 10$  мкм) выпраменьвання.

31.2. У колькі разоў энергія фатона ( $\lambda = 550$  мкм) большая за сярэднюю кінетычную энергію паступальнага руху атама гелію пры пакаёвай тэмпературы ( $17^\circ \text{C}$ )?

31.3. Ці належыць да бачнага святла выпраменьванне, фатоны якога маюць энергію  $6 \cdot 10^{-19}$  Дж?

31.4. Знайдзіце даўжыню хвалі, калі адпаведны ёй фатон мае энергію  $10^{-19}$  Дж. Да якой часткі спектра належыць гэта даўжыня хвалі?

31.5. Пры дапамозе індукцыйнага паскаральніка электронаў (бэтатрона) трэба атрымаць фатоны  $\gamma$ -хваляў энергіяй 100 МэВ. Якая даўжыня хвалі гэтых прамянёў?

31.6. Устаноўце частату  $\nu$  святла і параўнаць энергію фатонаў, якія адпавядаюць даўжыням хваляў: 1)  $\lambda = 280$  нм; 2)  $\lambda = 254$  нм.

31.7. Вызначыць рэлятывісцкую масу фатона: 1) праменнай энергіі для  $\lambda = 0,40$  мкм і  $\lambda = 2$  нм; 2)  $\gamma$ -прамянёў ( $\lambda = 2,3$  нм).

31.8. Хвалю якой даўжыні павінен мець фатон, каб яго рэлятывісцкая маса была роўная масе спакою электрона?

31.9. Якая даўжыня хвалі адпавядае фатону, рэлятывісцкая маса якога  $1,66 \cdot 10^{-30}$  кг?

31.10. Энергія фатона 1 МэВ. Знайсці імпульс фатона.

31.11. Устаноўце энергію, рэлятывісцкія масу і імпульс фатона рэнтгенаўскіх хваляў з даўжынямі хваляў 100 і 2 пм. Параўнайце яго рэлятывісцкую масу з масай спакою.

31.12. Лічачы, што магутнасць лампы расейваецца ва ўсіх напрамках у выглядзе выпраменьванняў і што сярэдняя даўжыня хвалі 0,5 мкм, знайсці колькасць фатонаў, якія падаюць за 1 с на паверхню плошчай  $1 \text{ см}^2$ , размешчаную перпендыкулярна праменям на адлегласці 50 см ад лампы. Магутнасць лампы 25 Вт.

31.13. Пунктавая крыніца святла спажывае магутнасць  $N = 100$  Вт і раўнамерна выпраменьвае святло ва ўсе бакі. Даўжыня хвалі святла, якое пры гэтым выпраменьваецца,  $\lambda = 589$  нм. ККДз крыніцы 0,1 %. Вылічыць колькасць фатонаў, якія выпраменьвае крыніца за 1 с.

31.14. Флюктуацыі слабых светлавых патокаў былі ўпершыню выяўлены візуальным метадам і вывучаны С.І. Вавілавым. Колькасць фатонаў у светлавым патоку мяняецца ад 90 да 120 за 1 с (частата аднолькавая). Вызначыць пры гэтым змяненне магутнасці светлавых патокаў.

31.15. Пры якой тэмпературы сярэдняя кінетычная энергія цеплавога руху малекул аднаатамнага газу роўная энергіі фатонаў рэнтгенаўскіх прамянёў ( $\lambda = 0,1$  нм)?



## Фотаэфект

31.16. Адзін з вынікаў доследу А.Г. Сталетава быў сфармуляваны так: «Разраджальнае дзеянне маюць прамяні самай высокай праламляльнасці, даўжыня якіх меншая за 295 нм». На падставе гэтага знайсці работу фотаэфекту для плаціны, серабра, вальфраму, танталу і цэзію.

31.17. Ці будзе мець месца фотаэфект у літыі, калі ён асвятляецца монахраматычным святлом з даўжынёй хвалі 589 нм?

31.18. Устанавіць чырвоную мяжу фотаэфекту для плаціны, серабра, вальфраму, танталу і цэзію.

31.19. Чырвоная мяжа фотаэфекту для жалеза, ртуці, літыю, натрыю, калію вызначаецца адпаведна даўжынямі хваляў 262, 274, 517, 540, 620 нм. Знайсці работу выхаду электронаў з металаў і выразіць яе ў электрон-вольтах.

31.20. На паверхню металу падаюць  $\gamma$ -прамяні ( $\lambda = 1,2$  пм). У параўнанні з энергіяй  $\gamma$ -фатонаў работа выхаду настолькі малая, што на яе можна не звяртаць увагі. Якая скорасць вылету электронаў, калі вылічыць яе па ўраўненні Эйнштэйна для фотаэфекту? Чым вытлумачыць атрыманы вынік?

31.21. Якая максімальная скорасць электронаў, якія вылятаюць з паверхні малібдэну пры асвятленні яго прамянямі з даўжынёй хвалі 200 нм?

31.22. Якой даўжыні электрамагнітную хвалю трэба накіраваць на паверхню цынку, каб максімальная скорасць электрона, які вылецеў з металу, была 0,8 Мм/с?

31.23. На паверхню нікелю падае монахраматычнае святло ( $\lambda = 200$  нм). Чырвоная мяжа фотаэфекту для нікелю 248 нм. Вызначыць энергію падаючых фатонаў, работу выхаду электронаў, максімальную кінетычную энергію электронаў і іх скорасць.

31.24. Чырвоная мяжа фотаэфекту для плаціны ляжыць каля 198 нм. Калі плаціну нагрэць пры высокай тэмпературы, чырвоная мяжа фотаэфекту будзе роўная 220 нм. На колькі электрон-вольт награванне памяншае работу выхаду электронаў?

31.25. На незараджаную металічную пласцінку, далучаную да электрометра, накіравалі пучок рэнтгенаўскіх прамянёў. Калі пласцінка зарадзілася да патэнцыялу  $\varphi = 124$  В, эмісія электронаў спынілася. Знайсці даўжыню рэнтгенаўскіх прамянёў. На работу выхаду электронаў не звяртаць увагі.

31.26. На металічную пласцінку падае монахраматычнае святло з даўжынёй хвалі  $5 \cdot 10^{-7}$  м. Знайсці работу выхаду электронаў з металу. Лічыць, што паток вырываемых фотаэлектронаў з паверхні металу цалкам затрымліваецца рознасцю патэнцыялаў тармазнага электрычнага поля, калі яна дасягае 1,5 В.

31.27. Чырвоная мяжа фотаэфекту рубідыю 810 нм. Якое затрымальнае напружанне трэба прыкласці да фотаэлемента, каб ніводнаму з электронаў,

якія выпускае рубідый пад дзеяннем ультрафіялетаваых прамянёў з даўжынёй хвалі 100 нм, не ўдалося пераадолець затрымальнае поле?

31.28. Ізаляваная металічная пласцінка асвятляецца святлом з даўжынёй хвалі 450 нм. Работа выхаду электронаў з металу 2 эВ. Да якога патэнцыялу зарадзіцца пласцінка пры няспынным дзеянні святла?

31.29. Фотаэлектроны, што вырываюцца з паверхні некаторага металу святлом з частатой  $2,2 \cdot 10^{15}$  Гц, цалкам затрымліваюцца патэнцыялам 6,6 В, а тыя, што вырываюцца святлом з частатой  $4,6 \cdot 10^{15}$  Гц, — патэнцыялам 16,5 В. Знайсці пастаянную Планка (гэты метадад вымярэння пастаяннай Планка быў прапанаваны П.І.Лукарскім).

### Ціск святла

31.30. У класічных доследах П.М. Лебедзева па эксперыментальным вызначэнні светлавога ціску паток прамянёвай энергіі накіроўваецца на крыльцы вельмі адчувальных круцільных вагаў. Вылічыць ціск, які дзейнічае на зачэрненыя і люстраныя крыльцы вымяральной устаноўкі, калі паток падаючай светлавой энергіі роўны  $1,05$  кДж/(м<sup>2</sup>·с).

31.31. Шчыльнасць патоку светлавой энергіі на паверхні  $7$  кВт/м<sup>2</sup>. Знайсці светлавы ціск для выпадкаў, калі паверхня: 1) цалкам адбівае ўсе хвалі; 2) цалкам паглынае ўсе хвалі, якія на яе падаюць.

31.32. Ціск выпраменьвання на плоскае люстэрка  $0,2$  Па. Вызначыць інтэнсіўнасць святла, якое падае на паверхню люстэрка з каэфіцыентам адбіцця ўсіх прамянёў. Лічыць, што светлавы паток нармальна падае на паверхню люстэрка.

31.33. Рускі астраном Ф.А. Браззіхін вытлумачыў форму каметных хвастоў ціскам сонечных прамянёў. Знайсці: 1) светлавы ціск сонечных прамянёў на абсалютна чорнае цела, змешчанае на той жа адлегласці ад Сонца, што і Зямля; 2) якой масы павінна быць часцінка ў каметным хвасце, змешчаная на гэтай адлегласці, каб сіла светлавога ціску на яе ўраўнаважвалася сілай прыцягнення часцінкі Сонцам. Плошчу часцінкі, якая адбівае ўсе прамяні, што падаюць на яе, лічыць роўнай  $0,5 \cdot 10^{-8}$  см<sup>2</sup>, а сонечную пастаянную, г. зн. праменную энергію, якую пасылае Сонца кожную секунду праз паверхню плошчы  $1$  м<sup>2</sup>, якая размешчана перпендыкулярна сонечным праменям і знаходзіцца блізка ад Зямлі за межамі яе атмасферы,  $S = 1,4$  кВт/м<sup>2</sup>.

31.34. Светлавы паток магутнасцю  $N = 9$  Вт нармальна падае на паверхню плошчай  $S = 10$  см<sup>2</sup>, каэфіцыент адбіцця якой  $\rho = 0,8$ . Які ціск адчувае пры гэтым дадзеная паверхня?

31.35. На паверхню плошчай  $S = 10$  см<sup>2</sup> падае пучок фатонаў інтэнсіўнасцю  $N = 9$  Вт. Даўжыня хвалі падаючага святла  $\lambda = 500$  нм. Устаноўце светлавы ціск на паверхню, калі каэфіцыент адбіцця паверхні  $\rho = 0,7$ .

31.36. Электрычная лампа разлічана на магутнасць  $N = 45$  Вт. Вызначыць светлавы ціск на люстраную паверхню з каэфіцыентам адбіцця  $\rho = 1$ ,



размещенную нормально на падающих лучей на расстоянии  $r = 1$  м лампы.

31.37. Небольшая электрическая дуга, которая работает на выпрямление имеет мощность  $N = 100$  Вт, размещена у центра кривизны вогнутого зеркала, площадь поверхности которого  $S = 300$  см<sup>2</sup>. Допуская, что дуга выпрямляется равномерно по всем направлениям, установите силу потока света на зеркало. Радиус кривизны зеркала  $r = 10$  см. Пусть, что зеркало идеально отражает свет.

31.38. Колба электрической лампы включает собой сферу радиусом  $r = 3$  см. Часть стенки колбы внутри покрыта. Лампа потребляет мощность  $N = 60$  Вт, 80 % которой затрачивается на выпрямление. Установите, сколько раз поток газа в колбе ( $p_r = 13,3$  мкПа) меньше за световой поток на покрытую часть стенки колбы с коэффициентом отражения  $\rho = 0,8$ .

31.39. Определите диаметр шарообразного спарожника, который находится в воздухе, если сила потока солнечного света на спарожник  $11,2$  мН, коэффициент отражения света от поверхности спарожника  $\rho = 1$ , солнечная постоянная  $C = 1,4$  кВт/м<sup>2</sup> (гл. задачу 31.33). На поглощение света в атмосфере не обращайте внимания.

### Рентгеновское поглощение

31.40. Рентгеновская трубка работает под напряжением 50 кВ. Найдите наименьшую длину волны в сплошном спектре рентгеновских лучей.

31.41. Установите скорость электрона рентгеновской трубки, который прошел разность потенциалов 10 кВ.

31.42. Наименьшая длина волны в сплошном спектре рентгеновских лучей, отсеченная в результате торможения электрона на антоде рентгеновской трубки,  $\lambda = 0,5$  нм. Какая наибольшая скорость электрона?

31.43. Антода рентгеновской трубки бомбардируется электронами, скорость которых 100 Мм/с. Установите максимальную частоту выпрямления в сплошном рентгеновском спектре в зависимости от релятивистской массы электрона от скорости его движения.

31.44. Наименьшая длина волны в рентгеновских лучах, отсеченных от трубки, которая работает при напряжении 40 кВ, равна 31 пм. Вычислите наименьшее значение длины волны в рентгеновском выпрямлении.

31.45. Выпрявление рентгеновской трубки падает на кристалл кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ). Наименьший угол между поверхностью кристалла и пучком рентгеновских лучей, при которых могут наблюдаться дифракция, составляет  $2^\circ 36'$ . Под каким напряжением работает трубка? Постоянная решетки кальцита  $3,04 \cdot 10^{-10}$  м.

### Закон Мозли

31.46. Найдите длину волны в линии  $K_\alpha$ -алюминия.

31.47. Вычислите разность энергий связи  $K$ - и  $L$ -электронов в ванадии.

31.48. Калі вядома, што даўжыня хвалі  $K_{\alpha}$ -лініі жалеза роўная 193 пм, падлічыць даўжыню хвалі  $K_{\alpha}$ -лініі медзі.

31.49. Колькі элементаў і якія ўтрымаюцца ў радзе паміж тымі, у якіх даўжыня хваляў  $K_{\alpha}$ -лініяй 193 пм і 154 пм?

31.50. Устанавіць інтэрвал даўжынь хваляў паміж  $K_{\alpha}$ -лініяй і кароткахвалевай мяжой суцэльнага рэнтгенаўскага спектра з медным антыкатодам пры напружанні 20 кВ.

31.51. Знайсці парадкавы нумар элемента антыкатада рэнтгенаўскай трубкай, калі пры павелічэнні на ёй напружання ад  $U_1 = 10$  кВ да  $U_2 = 20$  кВ інтэрвал даўжынь хваляў паміж  $K_{\alpha}$ -лініі і кароткахвалевай мяжой павялічыўся ў  $n = 3$  разы.

31.52. Прымаючы для малібдэну папраўку  $\sigma = 1$ , знайсці, пры якім найменшым напружанні на рэнтгенаўскай трубкай з малібдэнавым катодам праявіцца лініі серыі  $K_{\alpha}$ .

### Эфект Комптана. Інтэнсіўнасць рэнтгенаўскіх прамянёў

31.53. Вядома, што эфект Комптана назіраецца на свабодных электронах. Якія электроны ў рэчыве можна лічыць свабоднымі? Чаму эфект Комптана не назіраецца пры расейванні бачнага святла?

31.54. У тэорыі эфекту Комптана змяненне даўжыні хвалі пры расейванні не залежыць ад прыроды расейвальнага рэчыва. Ці з'яўляецца гэты вывад строгім?

31.55. Знайсці змяненне даўжыні хвалі святла пры расейванні яго пад вуглом  $90^\circ$  на свабодных першапачаткова супакоеных пратонах.

31.56. Вылічыць комптанаўскае перамяшчэнне і адноснае змяненне даўжыні хвалі для бачнага святла ( $\lambda = 500$  нм) і  $\gamma$ -прамянёў ( $\lambda = 5$  пм) пры расейванні на першапачаткова нерухомах свабодных электронах. Вугал расейвання  $90^\circ$ .

31.57. Фатон пры сутыкненні з рэлятывісцкім электронам расейваецца пад вуглом  $60^\circ$ , а электрон страціў амаль усю кінетычную энергію. Знайсці змяненне даўжыні хвалі фатона пры расейванні, калі да сутыкнення ён меў энергію 0,51 МэВ.

31.58. Вызначыць максімальнае комптанаўскае змяненне даўжыні хвалі пры расейванні фатонаў на свабодных першапачаткова супакоеных электронах і ядрах атамаў вадароду.

31.59. Рэнтгенаўскае выпраменьванне з даўжынёй хвалі 56,3 пм расейваецца пліткай графіту. Вызначыць даўжыню хвалі прамянёў, расейных пад вуглом  $120^\circ$  да першапачатковага напрамку рэнтгенаўскіх прамянёў.

31.60.  $\gamma$ -прамяні з даўжынёй хвалі 2,7 пм адчуваюць комптанаўскае расейванне. У колькі разоў даўжыня хвалі выпраменьвання, расейнага пад вуглом  $180^\circ$  да першапачатковага напрамку, большая за даўжыню хвалі падаючага выпраменьвання?

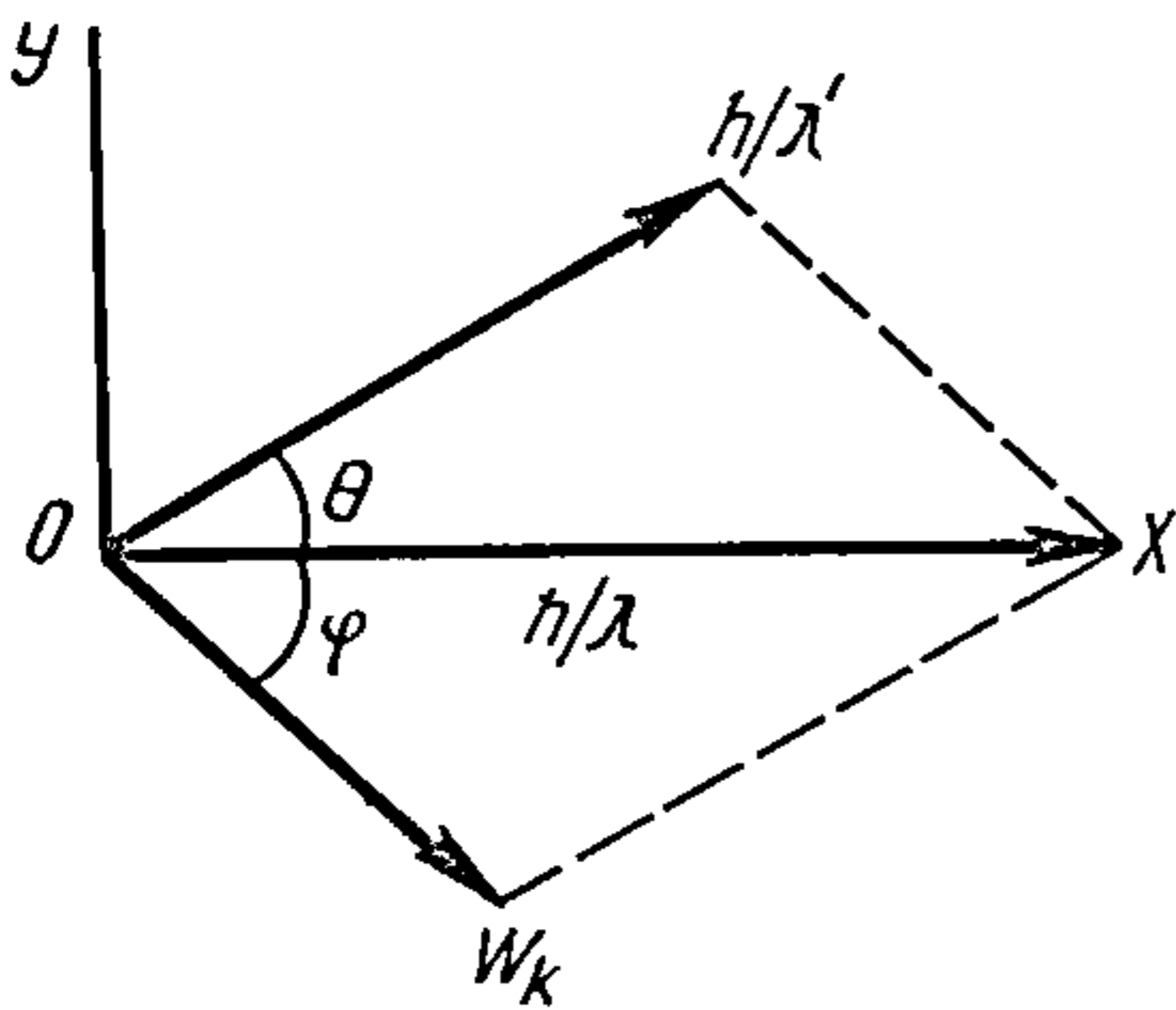


31.61. Фатон цвёрдых рэнтгенаўскіх прамянёў ( $\lambda = 24$  пм) пры сутыкненні са свабоднымі электронамі перадаў ім 9 % сваёй энергіі. Вызначыць даўжыню хвалі рассеянага рэнтгенаўскага выпраменьвання.

31.62. Змяненне даўжыні хвалі рэнтгенаўскіх прамянёў пры комптанаўскім рассеіванні 2,4 пм. Вылічыць вугал рассеяння і энергію, перададзеную пры гэтым электронам аддачы, калі даўжыня хвалі рэнтгенаўскіх прамянёў да ўзаемадзеяння 10,0 пм.

31.63. Якую энергію набудзе комптанаўскі электрон аддачы пры рассеіванні фатона пад вугламі 60, 90 і 180°, калі даўжыня хвалі падаючага фатона 3 пм?

31.64. Фатон энергіяй  $E = 0,75$  МэВ рассеяўся на свабодным электроне пад вуглом  $\varphi = 60^\circ$ . Знайсці энергію рассеянага фатона  $E'$ , кінетычную энергію і імпульс электрона аддачы. Кінетычную энергію электрона да сутыкнення не ўлічваць.



Рыс.31.1

31.65. Монахраматычныя  $\gamma$ -хвалі праходзяць праз вадарод. Вылічыць кінетычную энергію электронаў, якія атрымалі імпульс у напрамку, перпендыкулярным восі OX падаючага пучка фатонаў (рыс. 31.1). Даўжыня хвалі  $\lambda = 1,2 \cdot 10^{-9}$  м.

31.66. Рэнтгенаўскія прамяні з даўжынёй хвалі  $\lambda = 1,24$  пм праходзяць праз слой жалеза таўшчынёй  $d = 1,5$  см. У колькі разоў памяншаецца інтэнсіўнасць рэнтгенаўскіх прамянёў? Масавы каэфіцыент паглынання жалеза для хвалі гэтай даўжыні  $\mu_m = 5,6 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг.

31.67. Знайсці таўшчыню слоя свінцу, які памяншае ў 2 разы інтэнсіўнасць падаючых рэнтгенаўскіх прамянёў некаторай даўжыні хвалі. Масавы каэфіцыент паглынання свінцу для гэтай даўжыні хвалі  $\mu_m = 6,8 \cdot 10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг.

### Цеплавое выпраменьванне

31.68. Якая тэмпература печы, калі вядома, што з адтуліны ў ёй плошчай 4 см<sup>2</sup> выпраменьваецца за 1 с энергія 22,7 Дж? Выпраменьванне лічыць бліжнім да выпраменьвання абсалютна чорнага цела.

31.69. Паралельны пучок  $\gamma$ -выпраменьвання нармальна падае на паверхню вады. Знайсці таўшчыню слоя палавіннага аслаблення інтэнсіўнасці пучка ў вадзе. Лінейны каэфіцыент паглынальнасці  $\mu = 0,05$  см<sup>-1</sup>.

31.70. Зямля ў выніку выпраменьвання ў сярэднім кожную мінуту траціць з паверхні плошчай 1 м<sup>2</sup> энергію 5,4 кДж. Пры якой тэмпературы абсалютна чорнае цела выпраменьвала б такую ж энергію?

31.71. Вылічыць таўшчыню слоя палавіннага аслаблення інтэнсіўнасці вузкага пучка  $\gamma$ -выпраменьвання для бетону. Энергія фатона  $\epsilon = 0,6$  МэВ.

31.72. Вылічыць энергію, якая выпраменьваецца з паверхні Сонца плошчай  $1\text{ м}^2$  за 1 мін, калі прыняць тэмпературу яго паверхні роўнай  $5800\text{ К}$ . Лічыць, што Сонца выпраменьвае як абсалютна чорнае цела.

31.73. Устаноўце магутнасць, якую выпраменьвае абсалютна чорны шар радыусам  $10\text{ см}$ , што знаходзіцца ў пакоі пры тэмпературы  $20\text{ }^\circ\text{С}$ .

31.74. Тэмпература абсалютна чорнага цела змяняецца ад  $727$  да  $1727\text{ }^\circ\text{С}$ . У колькі разоў зменіцца пры гэтым энергія, якую выпраменьвае цела?

31.75. Тэмпература абсалютна чорнага цела  $127\text{ }^\circ\text{С}$ . Пасля павышэння тэмпературы сумарная магутнасць выпраменьвання павялічылася ў  $3$  разы. На колькі павысілася пры гэтым тэмпература?

31.76. Кацёл з вадой пры тэмпературы  $97\text{ }^\circ\text{С}$  выпраменьвае энергію на руку назіральніка, тэмпература на паверхні якой  $27\text{ }^\circ\text{С}$ . У колькі разоў больш энергіі атрымае цела пры тэмпературы  $0\text{ }^\circ\text{С}$  такой жа паверхні за адзін і той жа час на той самай адлегласці? Выпраменьванне лічыць бліжкім да выпраменьвання абсалютна чорнага цела.

31.77. Якую энергію выпраменьвае на працягу сутак каменны атынкаваны будынак з паверхняй агульнай плошчай  $1000\text{ м}^2$ , калі тэмпература выпраменьвальнай паверхні  $0\text{ }^\circ\text{С}$ ? Адносіна энергетычных свяцільнасцей каменнага атынкаванага будынка і абсалютна чорнага цела для дадзенай тэмпературы  $k = 0,8$ .

31.78. Стальная балванка, тэмпература якой  $727\text{ }^\circ\text{С}$ , выпраменьвае за  $1\text{ с}$   $4\text{ Дж}$  энергіі з паверхні плошчай  $1\text{ см}^2$ . Вызначыць адносіну энергетычных свяцільнасцей стальной балванкі і абсалютна чорнага цела пры дадзенай тэмпературы, лічачы, што яна аднолькавая для ўсіх хваляў.

31.79. Сажа пры тэмпературы  $T = 410\text{ К}$  за час  $t = 6\text{ мін}$  выпраменьвае энергію  $E = 80\text{ Дж}$ . Знайсці каэфіцыент цеплавога выпраменьвання. Плошча паверхні  $S = 2\text{ см}^2$ .

31.80. Можна ўмоўна лічыць, што Зямля выпраменьвае як шэрае цела пры тэмпературы  $T = 285\text{ К}$ . Вызначыць каэфіцыент цеплавога выпраменьвання Зямлі. Энергетычная свяцільнасць паверхні  $5,5\text{ кДж}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ .

31.81. Не звяртаючы ўвагі на страты цеплаправоднасці, знайсці магутнасць электрычнага току, неабходную для награвання ніці дыяметрам  $1\text{ мм}$  і даўжынёй  $20\text{ см}$  да тэмпературы  $2500\text{ К}$ . Лічыць, што ніць выпраменьвае як абсалютна чорнае цела і пры ўстанаўленні раўнавагі ўся колькасць цеплыні, што вылучаецца з ніці, траціцца на выпраменьванне.

31.82. Плошча паверхні вальфрамавай ніці напалу вакуумнай лампы магутнасцю  $25\text{ Вт}$  роўная  $0,403\text{ см}^2$ , а яе тэмпература напалу  $2177\text{ }^\circ\text{С}$ . У колькі разоў менш энергіі выпраменьвае лампа, чым абсалютна чорнае цела з паверхні такой жа плошчы пры той жа тэмпературы? Лічыць, што пры ўстанаўленні раўнавагі ўся колькасць цеплыні, якая вылучаецца з ніці, траціцца на выпраменьванне.

31.83. Сонечная пастаянная.  $C = 1,4\text{ кВт}/\text{м}^2$  (гл. задачу 31.33). Улічваючы, што Сонца выпраменьвае як абсалютна чорнае цела, вызна-



чыць тэмпературу яго выпраменьвальнай паверхні.

31.84. Абсалютна чорная пласцінка, якая знаходзіцца блізка ад Зямлі за межамі яе атмасферы, асвятляецца прамянямі, якія падаюць на яе перпендыкулярна. Вызначыць усталяваную тэмпературу пласцінкі, калі сонечная пастаянная  $C = 1,4 \text{ кВт/м}^2$  (гл. задачу 31.33).

31.85. Медны шарык з абсалютна чорнай паверхняй змясцілі ў адпампаваны сасуд, тэмпература якога каля абсалютнага нуля. Знайсці, праз які час тэмпература шарыка паменшыцца ў 2 разы. Пачатковая яго тэмпература  $T_1 = 300 \text{ К}$ . Лічыць, што ўдзельная цеплаёмістасць шарыка  $C = 395 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$  застаецца пастаяннай. Дыяметр шарыка  $d = 4 \text{ см}$ .

31.86. Жалезны шар дыяметрам 10 см, што нагрэты да тэмпературы  $1227^\circ \text{С}$ , астывае на адкрытым паветры. Праз які час яго тэмпература знізіцца да  $1000 \text{ К}$ ? Пры разліку прыняць, што адносіны энергетычных сваяцільнасцей жалеза і абсалютна чорнага цела 0,5. На цеплаправоднасць паветра не звяртаць увагі.

31.87. Пры спальванні ў вакууме тонкай вальфрамавай ніці моцным электрычным токам атрымліваецца на імгненне вельмі высокая тэмпература. Даўжыня хвалі, пры якой выпраменьвальная здольнасць гэтай ніці максімальная,  $145,0 \text{ нм}$ . Вызначыць тэмпературу ніці напалу ў момант яе спальвання.

31.88. У якой вобласці спектра ляжыць даўжыня хвалі, якая адпавядае максімуму выпраменьвальнай здольнасці Сонца, калі тэмпература яго паверхні  $5800 \text{ К}$ ?

31.89. Тэмпература паверхні зоркі  $12000 \text{ К}$ . Ці можна ўстанавіць гэтую тэмпературу па закону змяшчэння Віна, калі зямная атмасфера паглынае ўсе прамяні з даўжынёй хвалі, карацейшай за  $290 \text{ нм}$ ?

31.90. Колькі энергіі выпраменьвае абсалютна чорнае цела за  $1 \text{ с}$  з паверхні плошчай  $1 \text{ см}^2$ , якая свеціцца, калі максімум выпраменьвальнай здольнасці прыпадае на даўжыню хвалі  $725,0 \text{ нм}$ ?

31.91. З адтуліны ў печы плошчай  $10,0 \text{ см}^2$  выпраменьваецца  $250,0 \text{ кДж}$  энергіі за  $1 \text{ мін}$ . У якой вобласці спектра ляжыць даўжыня хвалі, на якую прыпадае максімум выпраменьвальнай здольнасці?

31.92. Пры выпраменьванні абсалютна чорнага цела максімум выпраменьвальнай здольнасці падае на даўжыню хвалі  $680 \text{ нм}$ . Колькі энергіі выпраменьвае гэтае цела плошчай  $1 \text{ см}^2$  за  $1 \text{ с}$  і якія страты яго масы за  $1 \text{ с}$  у выніку выпраменьвання?

31.93. Даўжыня хвалі, якая адпавядае максімуму выпраменьвальнай здольнасці абсалютна чорнага цела,  $720,0 \text{ нм}$ , плошча выпраменьвальнай паверхні —  $5,0 \text{ см}^2$ . Вызначыць магутнасць выпраменьвання.

31.94. У колькі разоў павялічыцца магутнасць выпраменьвання абсалютна чорнага цела, калі максімум выпраменьвальнай здольнасці перамясціцца ад  $700,0$  да  $600,0 \text{ нм}$ ?

31.95. Пры рабоце электрычнай лампы напальвання вальфрамавы вала-

сок нагрэўся, у выніку чаго даўжыня хвалі, на якую прыпадае максімум выпраменьвальнай здольнасці, змянілася ад 1,4 да 1,1 мкм. У колькі разоў павялічылася пры гэтым максімальная выпраменьвальная здольнасць, калі лампу лічыць абсалютна чорным целам? На колькі змянілася пры гэтым тэмпература валаска?

31.96. Тэмпература абсалютна чорнага цела змянілася пры награванні ад 1327 да 1727 °С. На колькі змянілася пры гэтым даўжыня хвалі, на якую прыпадае максімум выпраменьвальнай здольнасці, і ў колькі разоў павялічылася максімальная выпраменьвальная здольнасць?

31.97. Пакажыце, што пры нізкіх частотах формула Планка прыводзіцца да выражэння Рэлея—Джынса. Які выгляд яна прымае пры высокіх частотах?

31.98. Карыстаючыся формулай Планка, атрымаць закон Стэфана—Больцмана і вызначыць пастаянную ў законе змяшчэння Віна.

## §32. ХВАЛЕВЫЯ ЎЛАСЦІВАСЦІ РЭЧЫВА

Фазавае скорасць хваль дэ Бройля:

$$v = \omega / k,$$

дзе  $\omega$  — кругавая частата;  $k$  — хвалевы лік:  $k = 2\pi / \lambda$ .

Групавая скорасць хваляў дэ Бройля

$$u = d\omega / dk.$$

Адносіны дэ Бройля:

$$E = \hbar\omega; \quad \vec{p} = \hbar\vec{k},$$

дзе  $E$  — энергія часцінкі, якая рухаецца;  $\vec{p}$  — імпульс часцінкі;  $\vec{k}$  — хвалевы вектар;  $|\vec{k}| = k = 2\pi / \lambda$ .

Даўжыня хвалі дэ Бройля ў двух выпадках:

у класічным набліжэнні ( $v \ll c$ ,  $p = m_0 v$ )

$$\lambda = 2\pi\hbar / p;$$

у рэлятывісцкім выпадку ( $p = mv = m_0 v / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ )

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{m_0 v} \sqrt{1 - v^2 / c^2}.$$

Сувязь даўжыні хвалі дэ Бройля з кінетычнай энергіяй  $E_k$  часцінкі:

у класічным набліжэнні

$$\lambda = 2\pi\hbar / \sqrt{2m_0 E_k};$$

у рэлятывісцкім выпадку

$$\lambda = 2\pi\hbar c / \sqrt{E_k (E_k + 2E_{0k})},$$

дзе  $E_{0k}$  — энергія спакою часцінкі ( $E_{0k} = m_0 c^2$ ).

Прынцып невызначальнасці Гейзенберга:

для каардынаты і імпульса часцінкі

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar,$$



дзе  $\Delta p_x$  — невызначальнасць пракцыі імпульса часцінкі на вось  $Ox$ ;  $\Delta x$  — невызначальнасць яе каардынаты;

для энергіі і часу

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar,$$

дзе  $\Delta E$  — невызначальнасць энергіі дадзенага квантавага становішча;  $\Delta t$  — час знаходжання сістэмы ў гэтым становішчы.

Ураўненне Шродзінгера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi = i\hbar \frac{d\psi}{dt},$$

дзе  $m$  — маса часцінкі;  $\psi(x, y, z, t)$  — поўная хвалеваая функцыя;  $U$  — патэнцыяльная энергія часцінкі;  $i$  — уяўная адзінка.

Аператар Лапласа

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}.$$

Ураўненне Шродзінгера для стацыянарных станаў:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U)\psi = 0,$$

дзе  $E$  — поўная энергія часцінкі.

Хвалевыя функцыі задавальняюць умове нарміравання:

$$\int \psi^* \psi dV = 1.$$

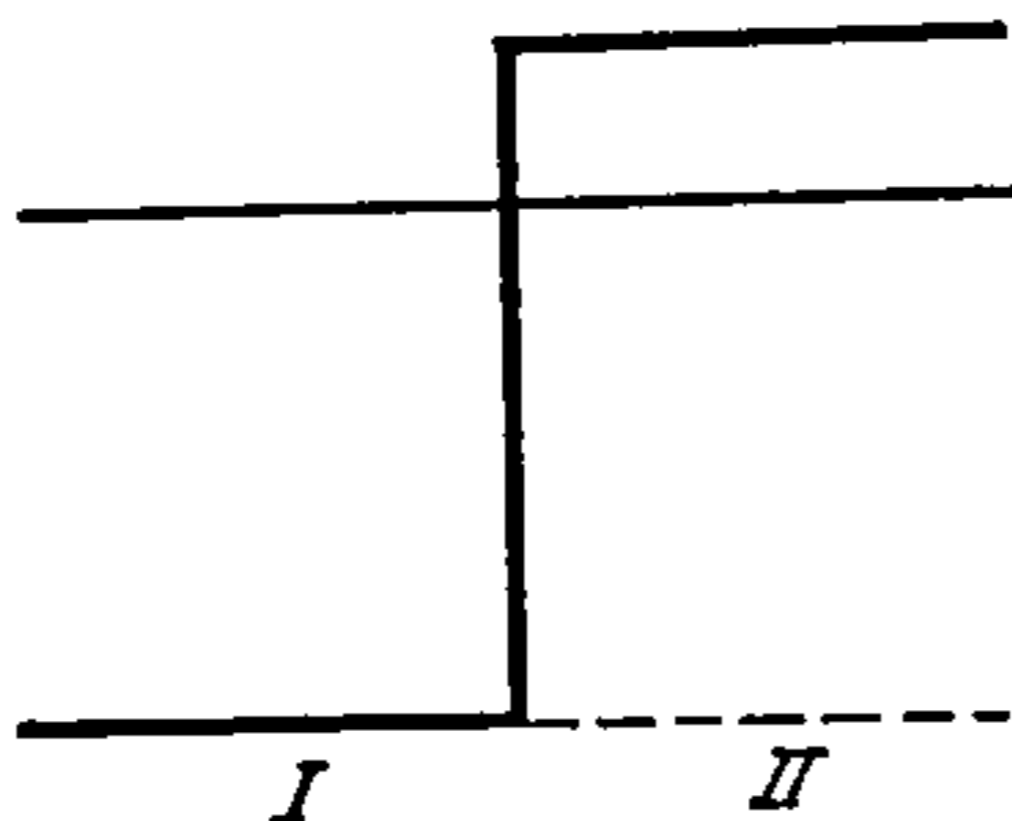
Каэфіцыент адбіцця хваль дэ Бройля ад нізкага  $(U - E)$  патэнцыяльнага бар'ера бясконцай шырыні (рыс. 32.1)

$$R = (k_1 - k_2)^2 / (k_1 + k_2)^2,$$

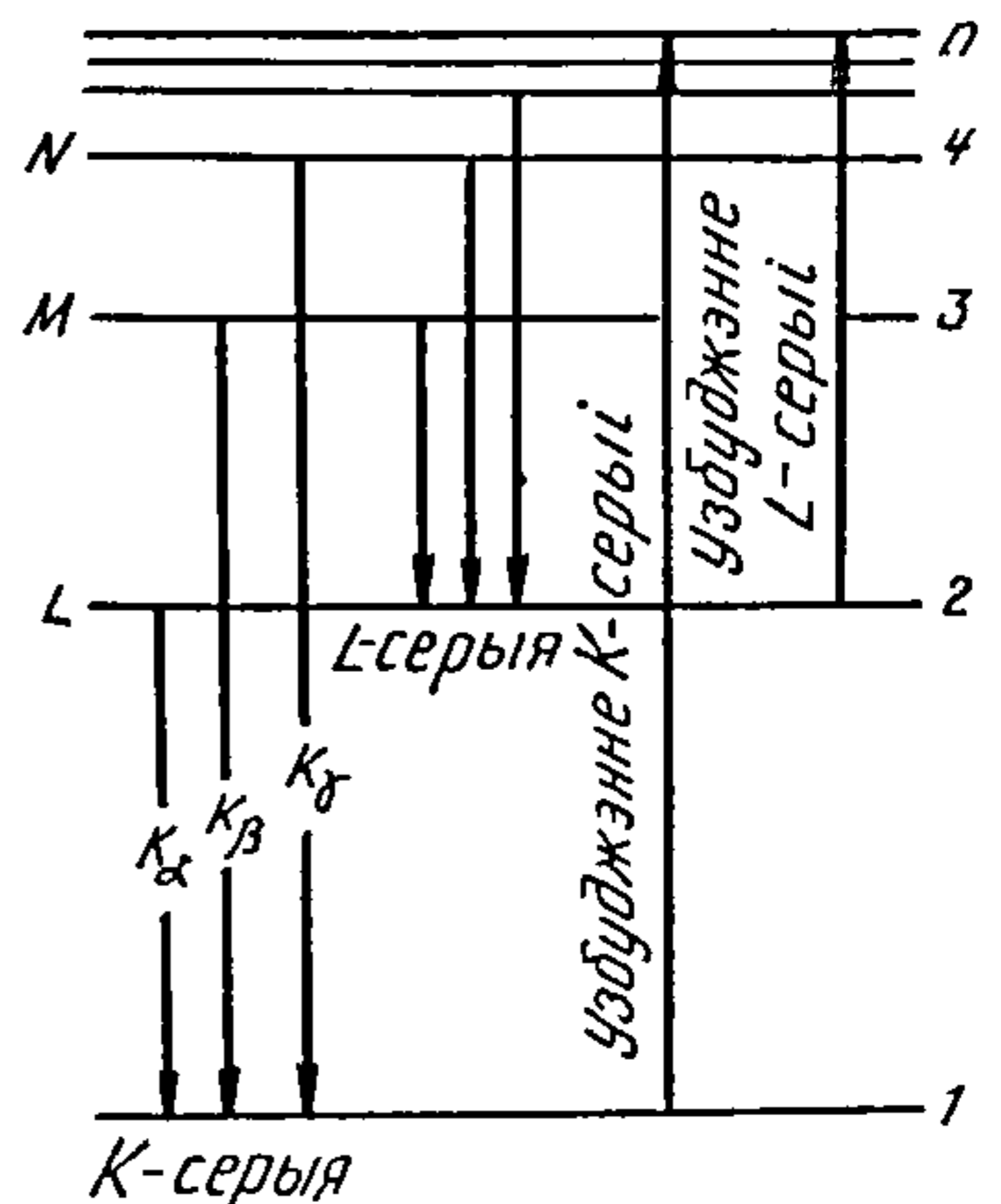
дзе  $k_1, k_2$  — значэнні хвалевага ліку ў абласцях I і II (хвалевы лік  $k = 2\pi / \lambda$ ).

Каэфіцыент празрыстасці патэнцыяльнага бар'ера:

$$D \approx \exp \left[ -\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U-E)} dx \right],$$



Рыс.32.1



Рыс.32.2

дзе  $x_1$  і  $x_2$  — каардынаты пунктаў, паміж якімі  $U > E$ .

Схема ўзнікнення рэнтгенаўскіх спектраў — на рыс. 32.2.

## Хвалі дэ Бройля

32.1. Фазавае скорасць хваляў дэ Бройля ў рэлятывісцкім выпадку большая за скорасць святла ў вакууме. Ці магчымы такія вападак, зыходзячы з тэорыі адноснасці?

32.2. Вядома, што груповае скорасць  $u = d\omega/dk$ . Знайсці групавую скорасць хваляў дэ Бройля ў нерэлятывісцкім і рэлятывісцкім выпадках.

32.3. Знайсці даўжыню хвалі дэ Бройля электрона, які рухаецца са скорасцю: 1) 20 км/с; 2) 0,8 км/с.

32.4. Скорасць так званых цеплавых нейтронаў, сярэдня кінетычная энергія якіх блізкая да сярэдняй энергіі атамаў газу пры пакаёвай тэмпературы, 2,5 км/с. Знайсці даўжыню хвалі дэ Бройля для такіх нейтронаў.

32.5. У тэлевізійнай трубцы праекцыйнага тыпу электроны разганяюцца да скорасці  $10^8$  м/с. Вызначыць даўжыню хвалі катодных прамянёў без уліку і з улікам залежнасці масы ад скорасці.

32.6. Вылічыць даўжыню хвалі дэ Бройля для пратона з кінетычнай энергіяй 100 эВ.

32.7. Даўжыня хвалі дэ Бройля паменшылася ад  $1,0 \cdot 10^{-10}$  да  $5,0 \cdot 10^{-10}$  м. Якую энергію неабходна пры гэтым дадаткова перадаць электрону?

32.8. Нейтрон з кінетычнай энергіяй  $E_k = 30$  эВ налятае на ядро дэйтэрыя  ${}^2_1\text{D}$ , якое знаходзіцца ў стане спакою. Знайсці даўжыню хвалі дзвюх часцінак.

32.9. Знайсці даўжыню хвалі дэ Бройля для  $\alpha$ -часцінкі, нейтрона і малекулы азоту, якія рухаюцца з сярэдняй квадратычнай скорасцю пры тэмпературы  $25^\circ \text{C}$ .

32.10. Вылічыць кінетычную энергію электрона, малекулы кіслароду і часцінкі, радыус якой 0,1 мкм і шчыльнасць  $2000 \text{ кг/м}^3$ , калі кожнай з гэтых часцінак адпавядае даўжыня хвалі дэ Бройля 100 пм.

32.11. Рэлятывісцкая часцінка рухаецца з кінетычнай энергіяй  $E_k$ . Атрымайце выражэнне для даўжыні хвалі дэ Бройля.

32.12. Электрон прайшоў рознасць патэнцыялаў 510 кВ. Вызначыць даўжыню хвалі дэ Бройля з улікам рэлятывісцкіх эфектаў.

32.13. Пры тармажэнні электронаў на антыкатодзе рэнтгенаўскай трубкі ўзнікае тармажны рэнтгенаўскі спектр з кароткахвалевай мяжой  $\lambda_0 = 10^{-10}$  м. Знайсці даўжыню хвалі дэ Бройля для электрона, лічачы яго рэлятывісцкім.

32.14. Якой кінетычнай энергіяй валодае пратон з даўжынёй хвалі дэ Бройля, роўнай гранічнай даўжынёй хвалі рэнтгенаўскіх прамянёў, якія ўзнікаюць у трубцы пры рознасці патэнцыялаў  $\Delta\varphi = 40$  эВ?



32.15. Паралельны пучок электронаў падае перпендыкулярна на шчыліну шырынёй  $b = 1$  мкм. Электроны пры праходжанні праз шчыліну ўтвараюць на экране дыфракцыйную рашотку. Знайсці адлегласць паміж першымі дыфракцыйнымі мінімумамі. Экран размешчаны нармальна падаючаму пучку на адлегласці  $a = 60$  см ад шчыліны. Скорасць падаючых электронаў  $v = 5 \cdot 10^3$  км/с.

32.16. Паралельны паток электронаў паскараецца рознасцю патэнцыялаў  $\Delta\varphi = 30$  В. Ён падае нармальна на дыфрагму з дзвюма вузкімі шчылінамі, адлегласць паміж якімі  $d = 4 \cdot 10^{-5}$  м. Устанавіць адлегласць паміж суседнімі максімумамі дыфракцыйнай карціны на экране, які знаходзіцца на адлегласці  $l = 80$  см ад шчыліны.

32.17. Электрон мае аднолькавую дэбройлеўскую і комптанаўскую даўжыню хваляў. Знайсці яго кінетычную энергію.

32.18. На грань крышталю нікелю падае пад вуглом  $\varphi = 64^\circ$  да паверхні грані паралельны пучок электронаў, якія рухаюцца з аднолькавай скорасцю. Прыняць адлегласць паміж адпаведнымі плоскасцямі, паралельнымі грані крышталю,  $d = 200$  пм. Карыстаючыся ўраўненнем Вульфа — Брэга, знайсці скорасць электронаў, калі яны ўдзельнічаюць у інтэрферэнцыйным адбіцці 1-га парадку.

32.19. Электронны пучок з пастаяннай скорасцю падае на паверхню фтарыду літыю LiF. Знайсці паскаральную рознасць патэнцыялаў, пры якой назіраецца другі дыфракцыйны максімум пад вуглом  $\varphi = 1^\circ 30'$ . Лічыць адлегласць паміж адпаведнымі атамнымі плоскасцямі  $d = 380$  пм.

### Прынцып невызначальнасці Гейзенберга

32.20. Невызначальнасць скорасці электронаў, якія рухаюцца ўздоўж восі абсцыс, складае  $\Delta v = 10^2$  м/с. Якая пры гэтым нявызначанасць каардынаты  $x$ , што акрэслівае месцазнаходжанне электрона?

32.21. Малекулы вадароду ўдзельнічаюць у цеплавым руху пры тэмпературы  $T = 300$  К. Знайсці невызначальнасць каардынаты  $\Delta x$  малекул вадароду.

32.22. Якая невызначальнасць скорасці электрона ў атама вадароду? У колькі разоў знойдзеная скорасць большая за скорасць электрона на першай бораўскай арбіце? Лічыць, што найбольшая памылка ў вызначэнні каардынаты электрона будзе таго ж парадку, што і памер атама вадароду ( $d \approx 10^{-10}$  м).

32.23. Выкарыстоўваючы ўмовы задачы 32.22, ацаніць даўжыню хвалі дэ Бройля электрона ў атама вадароду.

32.24. Працягласць узбуджанага стану атама вадароду адпавядае прыкладна  $\Delta t = 10^{-7}$  с. Якая невызначальнасць энергіі ў гэтым стане?

32.25. Шырыня рэзанансу нараджэння часцінкі роўная 50 МэВ. Які час яе жыцця?

32.26. Найменшая недакладнасць, з якой можна знайсці каардынату электрона ў атаме вадароду, парадку  $10^{-10}$  м. Вылічыць нявызначанасць сярэдняй кінетычнай энергіі электрона ў няўзбуджаным атаме вадароду.

32.27. Паказаць, што ўяўленне аб класічным руху электрона ў атаме па бораўскіх арбітах супярэчыць прынцыпу нявызначанасці Гейзенберга.

### Ураўненне Шродзінгера

32.28. Знайсці агульнае рашэнне аднамернага часавога ўраўнення Шродзінгера для свабоднай часцінкі.

32.29. Паказаць, што рашэнне ўраўнення Шродзінгера для электрона, які знаходзіцца ў прамавугольнай патэнцыяльнай яме з бясконца высокімі сценамі, прыводзіць да дыскрэтных значэнняў энергіі.

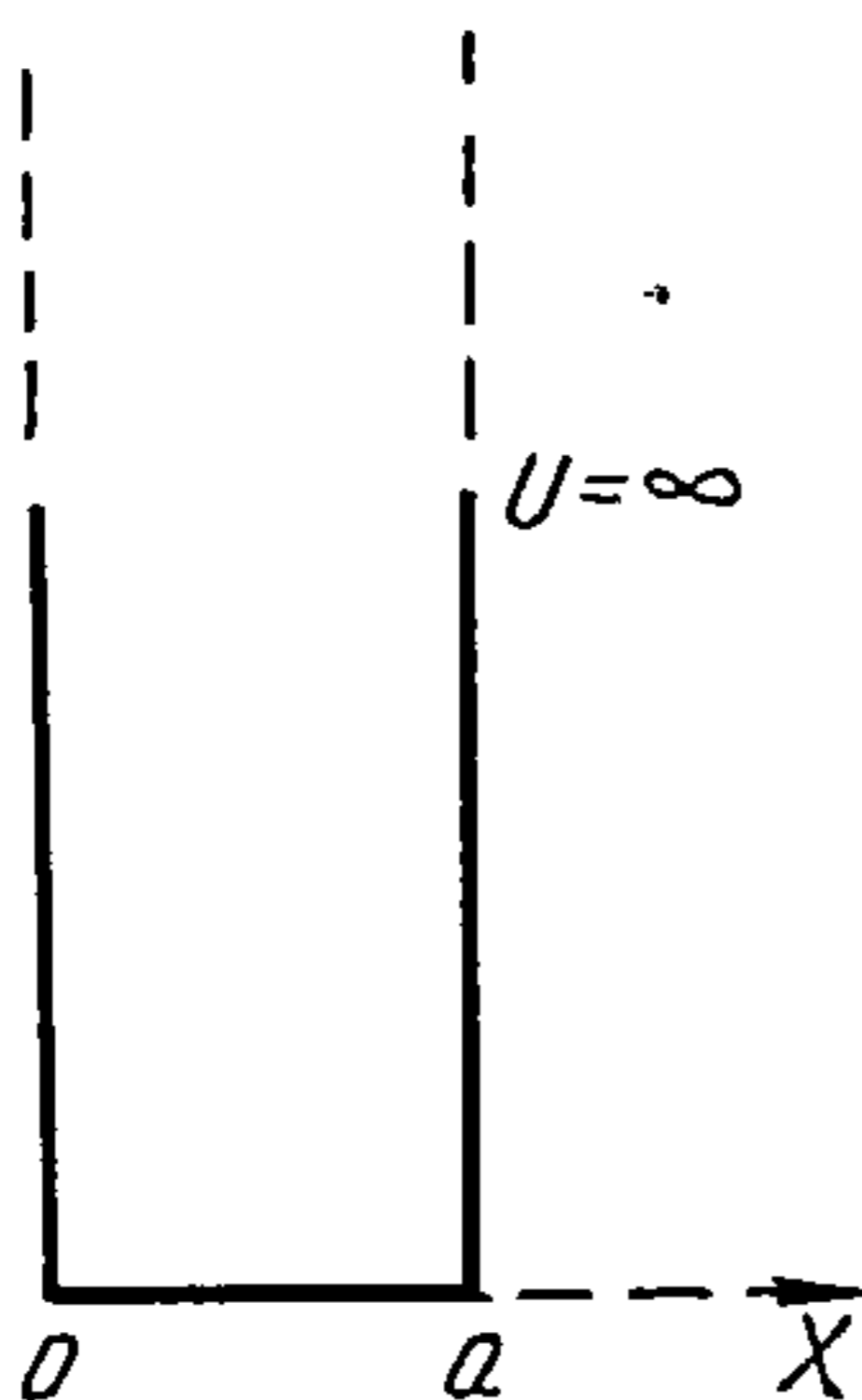
32.30. Электрон знаходзіцца ў аднамернай бясконца глыбокай патэнцыяльнай яме шырынёй  $d = 10^{-9}$  м з абсалютна непранікальнымі сценамі. Знайсці найменшую рознасць двух суседніх энергетычных узроўняў нейтрона.

32.31. Нейтрон знаходзіцца ў аднамернай бясконца глыбокай патэнцыяльнай яме шырынёй  $d = 10^{-14}$  м з абсалютна непранікальнымі сценамі. Знайсці найменшую рознасць двух суседніх энергетычных узроўняў нейтрона.

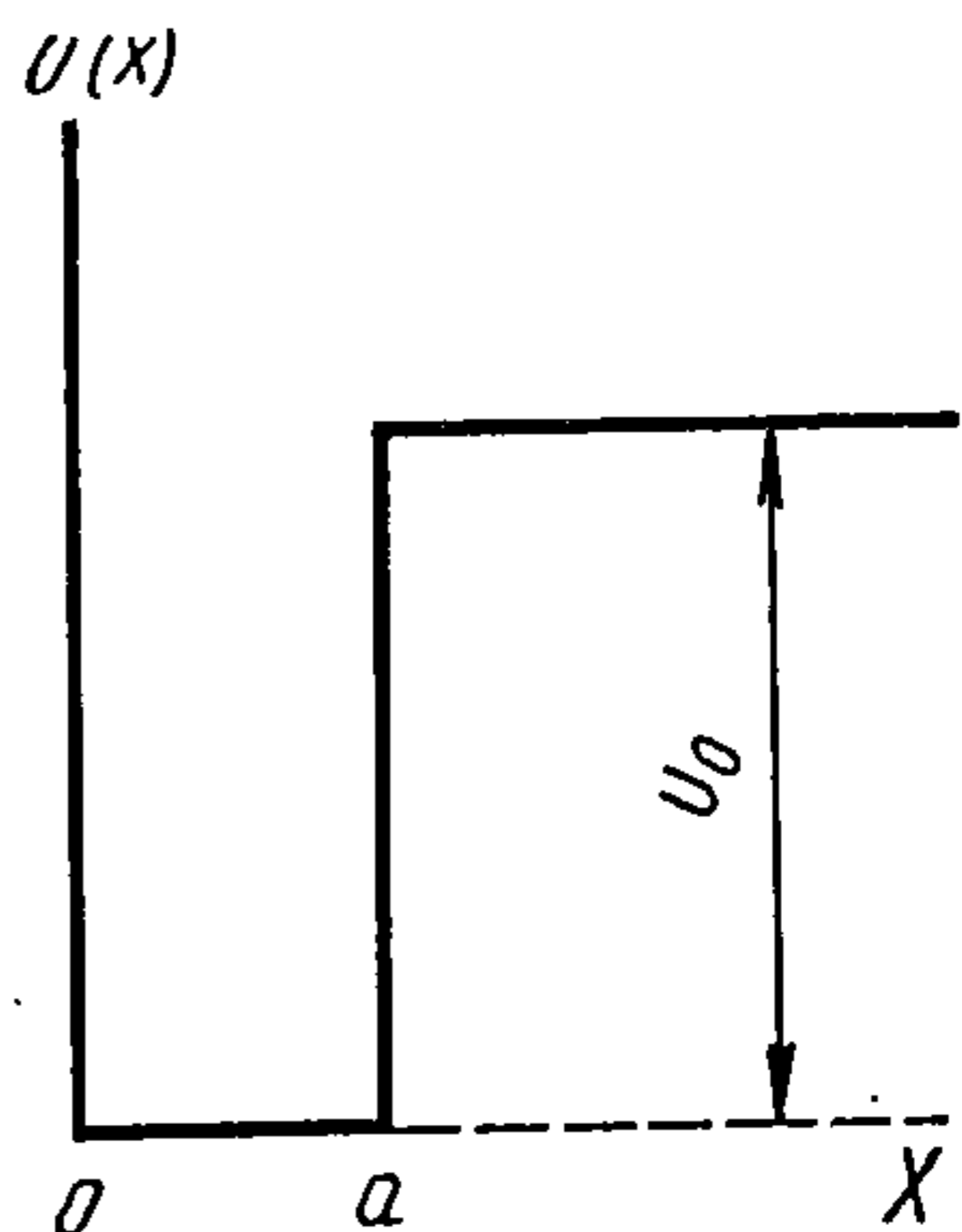
32.32. Знайсці ўласную функцыю і ўласныя значэнні апэратара энергіі для часцінкі з масай  $m$  у полі (рыс. 32.3):

$$U(x) = \begin{cases} \infty, & x \leq 0, \quad x \geq a; \\ 0, & 0 < x < a. \end{cases}$$

32.33. Мікрасчасцінка масай  $m$  знаходзіцца ў патэнцыяльнай яме (рыс. 32.4). Знайсці хвалевыя функцыі і спектр уласных значэнняў энергіі часцінак у вобласці энергій ( $E < U_0$ ). Лічыць, што пры  $x > a$   $U(x) = U_0$ , пры

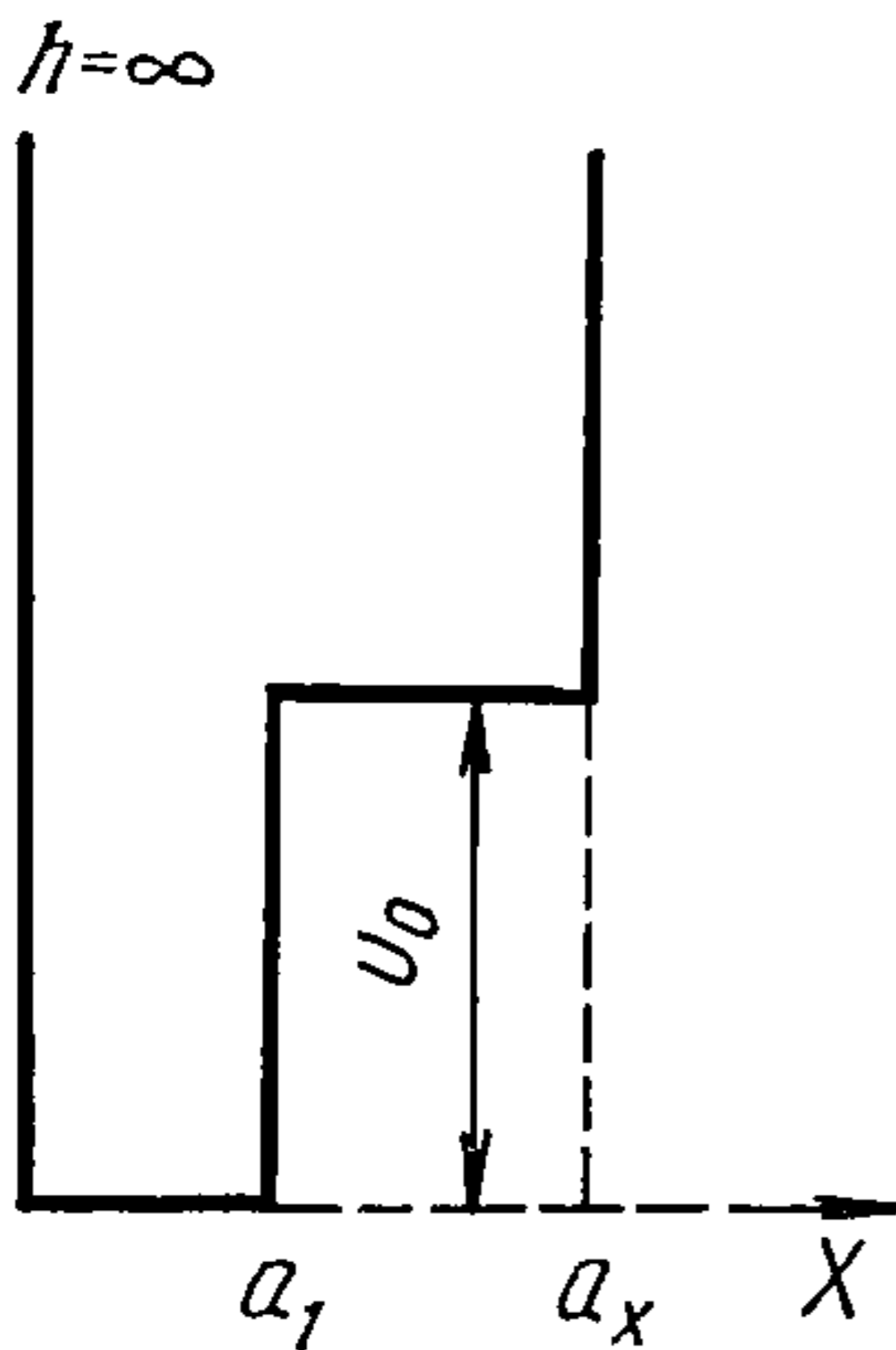


Рыс.32.3

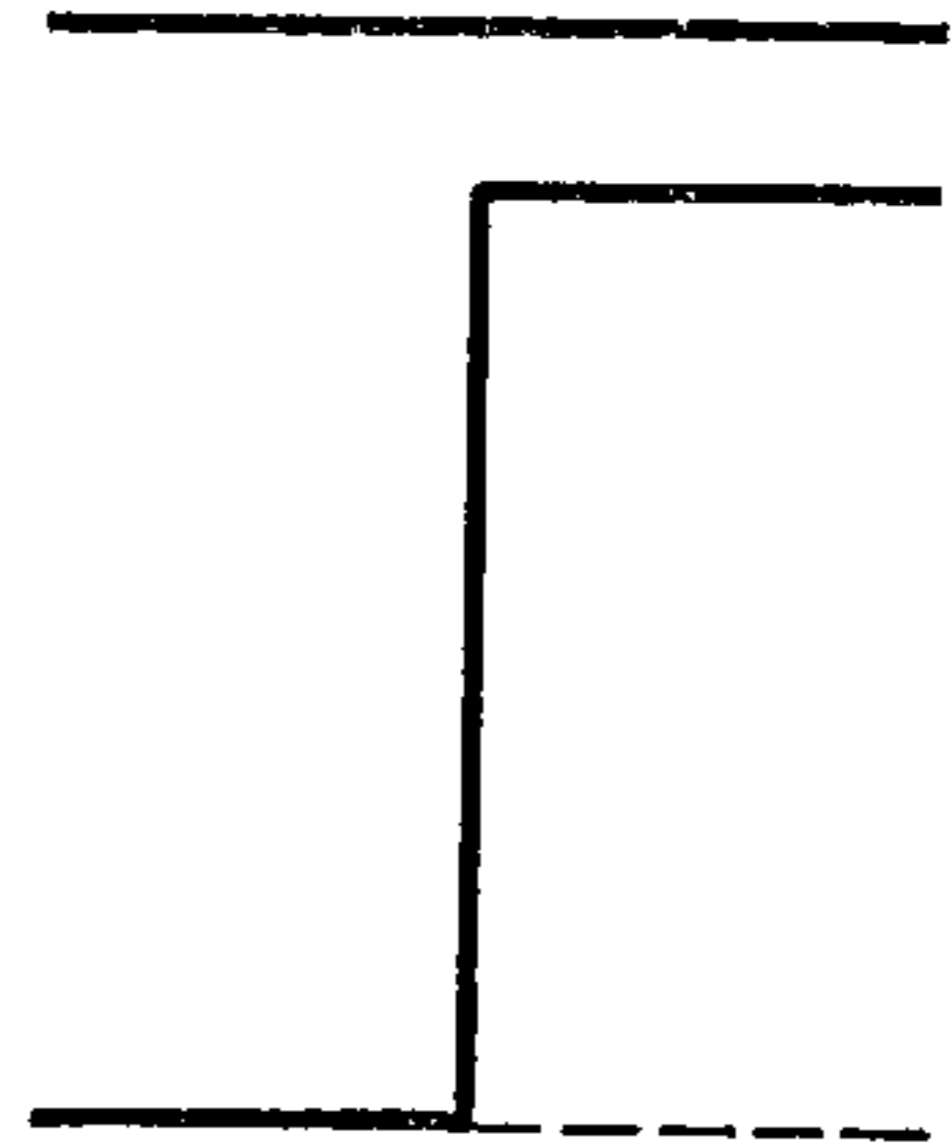


Рыс.32.4





Рыс.32.5



Рыс.32.6

$0 \leq x \leq a$   $U(x) = 0$ , а пры  $x = 0$   $U(x) \rightarrow \infty$ .

32.34. Мікрасцінка знаходзіцца ў аднамернай бясконца глыбокай патэнцыяльнай яме (рыс. 32.5). Знайсці ўраўненне, з дапамогай якога ўсталяваецца магчымыя значэнні дадзенай часцінкі ў выпадку, калі яе поўная энергія  $E > U_0$ .

32.35. Электроны энергіяй  $E = 16,0$  эВ на сваім шляху сустракаюць прамавугольны патэнцыяльны бар'ер вышыняй  $U = 4,0$  эВ (рыс. 32.6). Знайсці каэфіцыент адбіцця  $R$  і каэфіцыент прапускання  $D$  хваляў дэ Бройля для дадзенага бар'ера.

### §33. БУДОВА АТАМАЎ І МАЛЕКУЛ

Момант імпульсу электрона, які рухаецца вакол ядра, кратны  $\hbar$ :

$$L = m v_k r_k = k \hbar,$$

дзе  $m$  — маса электрона;  $v_k$  — яго скорасць на  $k$ -й арбіце;  $r_k$  — радыус гэтай арбіты;  $k = 1, 2, 3, \dots$  — цэлы станоўчы лік (галоўны квантавы лік).

Энергія светлавога фатона роўная рознасці энергіі тых стацыянарных станаў, паміж якімі адбываецца квантавы скачок электрона:

$$\hbar \omega = E_n - E_k,$$

дзе  $\omega$  — частата выпраменьвання;  $E_n$  — энергія электрона на арбіце  $n$ ;  $E_k$  — яго энергія на арбіце  $k$ .

Калі  $E_n > E_k$ , фатон выпраменьваецца, пры  $E_n < E_k$  назіраецца паглынне фатона з частатой  $\omega$ .

Энергія электрона, які знаходзіцца на  $k$ -й арбіце,

$$E_k = - \frac{m e^4}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 k^2},$$

дзе  $\epsilon_0$  — электрычная пастаянная.

Абагульненая формула Бальмера вызначае (абумоўлівае) даўжыню хвалі  $\lambda$  або частату  $\nu$

святла, якое выпраменьваецца (паглынаецца) атамам вадароду пры пераходзе з аднаго стацыянарнага стану ў другі:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right); \quad \nu = R^* \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

дзе  $R$  — пастаянная Рыдберга;  $k$  і  $n$  — цэлыя лікі;  $R^* = 3,29 \cdot 10^{-15} \text{ с}^{-1}$ ;  $k$  — нумар серыі спектральных ліній ( $k=1$  — серыя Лаймана;  $k=2$  — серыя Бальмера,  $k=3$  — серыя Пашэна і г.д.); для дадзенай серыі  $n=k+1$ ,  $n=k+2$ ,  $n=k+3$  і г.д. (рыс. 33.1).

Энергія фатона, якую выпраменьвае атам вадароду пры пераходзе з аднаго стацыянарнага стану ў другі,

$$\Delta E = E_i \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

дзе  $E_i = 2\pi\hbar R = 13,6 \text{ эВ}$  — энергія іанізацыі вадароду.

Прынцып Паўлі; у любой квантавай сістэме, напрыклад у атаме, немагчыма існаванне двух электронаў з аднолькавай чацвёркай квантавых лікаў  $n, l, m_l, m_s$ . Тут  $n=1, 2, 3, \dots$  — галоўны квантавы лік;  $l=0, 1, \dots, n-1$  — арбітальны квантавы лік;  $m_l = -l, \dots, 0, \dots, +l$  — магнітны квантавы лік;  $m_s = \pm 1/2$  — спінавы квантавы лік.

Сукупнасць электронаў, якія характарызуюцца фіксаванымі значэннямі  $n$  і  $l$  і адрозніваюцца толькі значэннямі магнітнага  $m_l$  і спінавага  $m_s$  квантавых лікаў, утвараюць абалонку.

Сукупнасць абалонак з аднолькавымі значэннямі  $n$  утварае групу або слой.

Слаі электронаў абазначаюць наступным чынам:

$n$	1	2	3	4	5	6	7
Слой	K	L	M	N	O	P	Q

Максімальная колькасць электронаў у слаі  $N_{\max} = 2n^2$ . Стан электронаў у абалонцы абазначаюць:

$l$	0	1	2	3	4	5
Стан	s	p	d	f	g	h

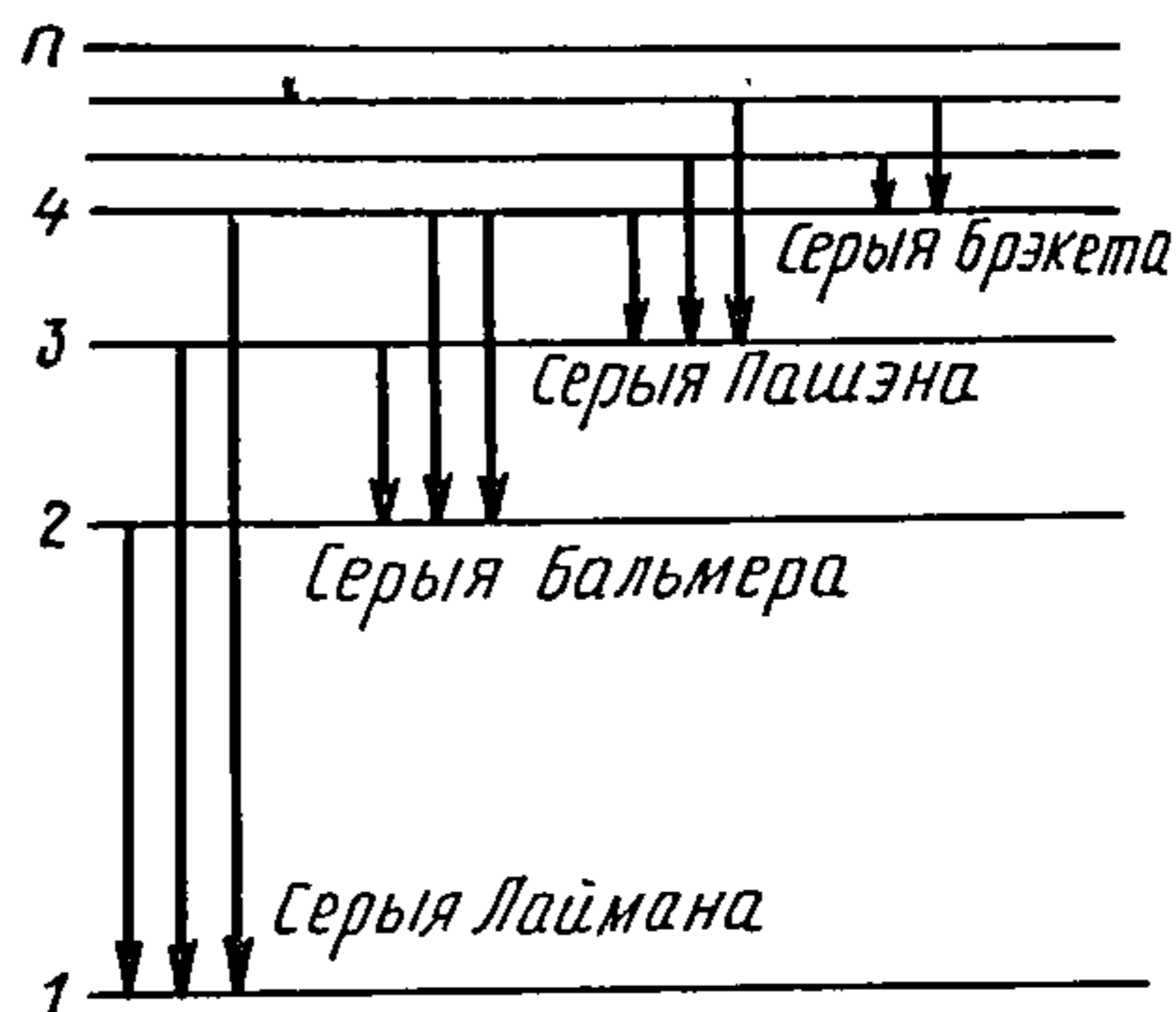
Колькасць электронаў, якія знаходзяцца на адной абалонцы, абазначаецца лікавым індэксам літарнага абазначэння стану  $s^2$ .

Нармальнае змяшчэнне частот спектральных ліній (лорэнцава змяшчэнне) у нармальным эфекце Зеемана:

$$\Delta\omega_0 = eH / (2m_e c).$$

Адносіны ўласна магнітнага і механічнага момантаў электрона:

$$\mu_s / M_s = -e / m_e.$$



Рыс.33.1

33.1. Даўжыня хвалі галоўнай лініі  $\lambda_1 = 813 \text{ нм}$  у атама літыю і даўжыня хвалі кароткахвалевай мяжы гэтай серыі  $\lambda_2 = 350 \text{ нм}$ . Знайсці энергію сувязі ў асноўным стане валентнага электрона ў асноўным стане атама літыю.

33.2. Мадэль Дж.Дж.Томсана ўяўляе сабой шар, які раўнамерна зара-



джаны па аб'ёму дадатнай электрычнасцю. Унутры шара знаходзяцца пунктавыя электроны. Зыходзячы з класічнай тэорыі, знайсці частату ваганняў электрона ў мадэлі Томсана з адным электронам. радыус атама Томсана  $\sim 3 \cdot 10^{-10}$  м.

33.3. Выкарыстоўваючы мадэль атама Рэзерфорда — Бора, вывесці формулу скорасці руху электрона па арбіце. Вылічыць яго скорасць на дзвюх першых электронных кругавых арбітах у атама вадароду.

33.4.  $\alpha$ -часцінка з кінетычнай энергіяй  $E_k = 0,40$  МэВ у лобным напрамку сутыкаецца са свабодным ядром літыя, які першапачаткова знаходзіцца ў стане спакою. Знайсці мінімальную адлегласць паміж ядром літыя і  $\alpha$ -часцінкай.

33.5. Электрон рухаецца па другой арбіце атама вадароду. Знайсці даўжыню хвалі дэ Бройля.

33.6. Стацыянарная электронная арбіта ўяўляе сабой устойлівы стан. Карыстаючыся ўмовамі квантавання, вывесці формулу радыуса дапушчальнай электроннай арбіты. Знайсці радыусы дзвюх першых арбіт электрона ў атама вадароду.

33.7. Пры дапамозе ўмоў квантавання вывесці формулу цэнтраімклівага паскарэння электрона на арбіце. Знайсці паскарэнні электронаў на дзвюх першых арбітах у атама вадароду.

33.8. На якой арбіце скорасць электрона атама вадароду роўная 734 км/с?

33.9. Вызначыць для першай і другой кругавых арбіт атама вадароду значэнні сілы кулонаўскага прыцягнення і напружанасці электрычнага поля.

33.10. У колькі разоў павялічыцца радыус арбіты электрона атама вадароду, які знаходзіцца ў асноўным стане, пры ўзбуджэнні яго фатонам энергіяй 12,09 эВ?

33.11. Атам вадароду выпраменьвае фатон частатой  $\nu$ . Знайсці змяненне даўжыні хвалі фатона, што адбываецца з прычыны аддачы, якую адчувае атам пры выпраменьванні.

33.12. Фатон частатой  $\omega$  паглынаецца атамам масай  $m_0$ , які знаходзіцца ў стане спакою. Знайсці скорасць атама пасля паглынання фатона.

33.13. Пераход электрона ў атаме вадароду з  $n$ -й на  $k$ -ю арбіту ( $k = 1$ ) суправаджаецца выпраменьваннем фатона даўжынёй хвалі  $\lambda = 102,6$  нм. Знайсці радыус  $n$ -й арбіты.

33.14. Атам вадароду пераведзены з нармальнага стану ва ўзбуджаны, які характарызуецца галоўным квантавым лікам 2. Знайсці энергію, неабходную для пераводу атама вадароду ў гэты ўзбуджаны стан.

33.15. Знайсці энергію  $E_i$  і патэнцыял  $U_i$  іанізацыі іонаў гелію  $He^+$  і літыю  $Li^{++}$ .

33.16. Кожнай дапушчальнай электроннай арбіце адпавядае пэўны энергетычны ўзровень, энергію якога можна ўявіць у выглядзе сумы патэн-

цыяльнай  $E_p$  і кінетычнай  $E_k$  энергіі электрона. Вывесці формулу поўнай энергіі электрона на  $k$ -й арбіце.

33.17. Атамная мадэль Рэзерфорда — Бора мае шэраг недахопаў. Паводле дэ Бройля, электрону адпавядае даўжыня хвалі  $\lambda = h / (mv_k)$ . Вызначыць даўжыню хваляў дэ Бройля электрона першай і трэцяй арбіт у атама вадароду. Паказаць, што на электронных арбітах атама вадароду ўкладваецца цэлы лік хваляў дэ Бройля.

33.18. Вызначыць межы серыі вадародных ліній, размешчаных у далёкай ультрафіялетавай частцы спектра (серыя Лаймана).

33.19. Першапачаткова супакоены атам вадарода вылучыў фатон, які адпавядае галоўнай лініі серыі Лаймана. Знайсці скорасць, якую атрымаў атам.

33.20. Спакойны іон гелію  $He^+$  вылучыў фатон, які адпавядае галоўнай лініі серыі Лаймана. Гэты фатон вырваў фотаэлектрон з асноўнага стану спакойнага атама вадароду. Вызначыць скорасць фотаэлектрона.

33.21. У спакойным атаме вадароду  $^1H$  электрон перайшоў з пятага энергетычнага ўзроўню ў асноўны стан. Якую энергію аддачы атрымае атам за кошт вылучаемага фатона?

33.22. Вылічыць энергію фатона, які адпавядае найменшай даўжыні хвалі, у ультрафіялетавай серыі вадароду.

33.23. Знайсці даўжыні хваляў першай, другой і трэцяй ліній бачнай серыі вадароду (серыя Бальмера).

33.24. На дыфракцыйную рашотку нармальна падае пучок святла ад разраднай трубки, якая напоўнена атамарным вадародам. Якому пераходу электрона адпавядае спектральная лінія? Яна назіраецца пры дапамозе гэтай рашоткі ў спектры пятага парадку пад вуглом  $\varphi = 41^\circ$ . Перыяд рашоткі  $d = 5 \cdot 10^{-6}$  м.

33.25. Якая даўжыня хвалі чацвёртай па парадку спектральнай лініі ў інфрачырвонай вобласці спектра вадароду (серыя Пашэна)?

33.26. Эксперыментальна ўстаноўлена, што другая спектральная лінія вадароднай серыі Брэкета адпавядае даўжыні хвалі 2,63 мкм. На падставе гэтых дадзеных устанавіць набліжанае значэнне пастаяннай Рыдберга.

33.27. Найбольшая даўжыня хвалі спектральнай вадароднай лініі серыі Лаймана 121,6 нм. Вылічыць найбольшую даўжыню хвалі серыі Бальмера.

33.28. Пры пераходзе электрона вадароднага атама з адной з магчымых арбіт на другую, больш блізкую да ядра, энергія атама змяншаецца на 1,892 эВ. Вызначыць даўжыню хвалі выпраменьвання.

33.29. Якую работу трэба выканаць, каб выдаліць электрон з другой арбіты атама вадароду за мяжу прыцягнення яго ядром?

33.30. Атам вадароду пераведзены з нармальнага стану ва ўзбуджаны, які характарызуецца галоўным квантавым лікам 3. Якія спектральныя лініі могуць з'явіцца ў спектры вадароду пры пераходзе атама з узбуджанага стану ў нармальны?



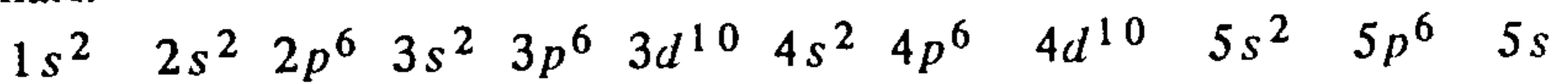
33.31. Якія спектральныя лініі з'являцца ў бачнай вобласці спектра пры ўзбуджэнні атамаў вадароду электронамі энергіяй 13,0 эВ?

33.32. Атам вадароду асвятляецца ультрафіялетавым выпраменьваннем даўжынёй хвалі 100,0 нм. Вызначыць, якія спектральныя лініі з'являцца ў спектры вадароду.

33.33. У якой вобласці спектра раўнаважнага (чорнага) выпраменьвання інтэнсіўнасць індцыраванага выпраменьвання большая за інтэнсіўнасць спантаннага? Тэмпература выпраменьвання  $T = 290$  К.

33.34. Якія магчымыя значэнні спіна (у адзінках  $\hbar$ ) наступных ядраў:  
1)  ${}^2_1\text{H}$ ; 2)  ${}^3_1\text{H}$ ; 3)  ${}^4_2\text{He}$ ?

33.35. Асноўны стан атама цэзію абазначаецца сімвалічна наступным чынам:



Знайсці колькасці: слаёў і абалонак; электронаў у кожным слаі і абалонцы; усіх электронаў.

33.36. Запісаць сімвалічна асноўны стан атама хлору.

33.37. У магнітным полі напружаннем  $H = (1/2\pi) 10^7$  А/м спектральная лінія  $\lambda = 500$  нм расшчапляецца. Вызначыць велічыню расшчаплення лініі.

33.38. Пад уплывам магнітнага поля расшчапленне спектральнай лініі 560 нм дасягнула 0,01 %. Якое павінна быць напружанне поля?

33.39. Вызначыць адносіны ўласных магнітнага і механічнага момантаў электрона.

33.40. Выкарыстоўваючы тэорыю Бора, знайсці арбітальны магнітны момант атама вадароду ў нармальным стане.

33.41. Якія адносіны паміж ядзерным магнетонам і магнетонам Бора?

33.42. Лазер на рубіне выпраменьвае ў імпульс амаль паралельны пучок. Знайсці шчыльнасць патоку ў пучку і ціск святла на плошчу, якая перпендыкулярная пучку. Энергія лазера ў імпульсе  $E = 1$  Дж. Даўжыня хвалі лазера  $\lambda = 0,694$  мкм. Працягласць выпраменьвання  $t = 0,4 \cdot 10^{-3}$  с. Плошча сячэння  $S = 0,8$  см<sup>2</sup>. Каэфіцыент адбіцця  $\rho = 0,5$ .

## §34. КВАНТАВЫЯ З'ЯВЫ У ЦВЁРДЫХ ЦЕЛАХ

Малярны аб'ём крышталю

$$V_m = M/\rho,$$

дзе  $M$  — малярная маса рэчыва,  $\rho$  — шчыльнасць крышталю.

Колькасць элементарных ячэек у 1 моль крышталю:

$$Z_m = V_m/V \quad \text{або} \quad Z_m = kN_A/n,$$

дзе  $V$  — аб'ём элементарнай ячэйкі;  $k$  — колькасць аднолькавых атамаў у хімічнай формуле;  $N_A$  — лік Авагадра;  $n$  — лік аднолькавых атамаў, якія прыпадаюць на элементарную ячэйку.

Колькасць элементарных ячэек у адзінцы аб'ёму крышталю

$$Z = Z_m / V_m .$$

Удельная электропроводность металла

$$\sigma = ne^2\tau / m ,$$

где  $n$  — концентрация свободных электронов;  $e$  — элементарный заряд;  $\tau$  — время релаксации;  $m$  — масса электрона.

Коэффициент подвижности тока

$$b = v_d / E = e\tau / m ,$$

где  $v_d$  — скорость дрейфа носителя тока;  $E$  — напряженность электрического поля.

Удельная электропроводность полупроводника

$$\sigma = en(b_n + b_p) = \sigma_0 \exp[-\Delta E / (2kT)] ,$$

где  $n$  — концентрация носителя заряда (электронов и дырок);  $b_n$  и  $b_p$  — коэффициенты подвижности электронов и дырок;  $\sigma_0$  — постоянная величина (в первом приближении);  $\Delta E = hc/\lambda$  — ширина запрещенной зоны.

У квантовой теории металла отношение коэффициента теплопроводности  $\kappa$  к коэффициенту электропроводности  $\sigma$  равно

$$\frac{\kappa}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left( \frac{k}{e} \right)^2 T ,$$

где  $k$  — постоянная Больцмана;  $e$  — заряд электрона.

Температурный коэффициент сопротивления полупроводника с собственной проводимостью

$$\alpha = - \frac{\Delta E}{2k} \frac{1}{T^2} ,$$

где  $\Delta E$  — ширина запрещенной зоны.

Внутренняя энергия кристалла по Эйнштейну

$$U_m = U_{m0} + 3R \frac{\theta_E}{\exp(\theta_E/T) - 1} ,$$

где  $U_{m0} = 3R\theta_E/2$  — внутренняя энергия по Эйнштейну;  $\theta_E = \hbar\omega/k$  — характеристическая температура Эйнштейна.

Внутренняя теплоемкость кристалла в квантовой теории теплоемкости Эйнштейна

$$C = 3R \left( \frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{\exp(\theta_E/T)}{[\exp(\theta_E/T) - 1]^2} ,$$

где  $R$  — газовая постоянная;  $\theta_E = \hbar\omega/k$  — характеристическая температура.

Внутренняя энергия кристалла по Дебаю

$$U_m = U_{m0} + 9N_A \frac{\hbar}{\omega_{\max}^3} \int_0^{\omega_{\max}} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1} ,$$

где  $U_{m0} = (9/8)R\theta_D$  — внутренняя энергия нулевых колебаний по Дебаю;  $\theta_D = \hbar\omega/k$  — характеристическая температура Дебая.

Внутренняя теплоемкость кристалла по Дебаю

$$C = 9R \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 \int_0^{x_{\max}} \frac{e^x x^4 dx}{(e^x - 1)^2} ,$$

где  $x = \hbar\omega/(kT)$  — переменная.



Функцыя Фермі

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - b)/(kT)] + 1}$$

Узровень або энергія Фермі ў метале пры  $T = 0$  К

$$E_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m} (3\pi^2 n)^{2/3},$$

дзе  $n$  — канцэнтрацыя свабодных электронаў у металах.

Цеплаёмістасць электроннага газу

$$C_v = \frac{\pi^2}{2} \frac{k^2 n}{E_F} T.$$

Фотаправоднасць паўправадніка

$$\gamma_{\text{ф}} = \gamma - \gamma_0 = e(U_n \Delta n + U_p \Delta p),$$

дзе  $\gamma, \gamma_0$  — каэфіцыент электраправоднасці адпаведна пры наяўнасці і адсутнасці асвятлення;  $U_n, U_p$  — рухомасць электронаў і дзірак адпаведна;  $\Delta n, \Delta p$  — дадатковая колькасць электронаў і дзірак у адзінцы аб'ёму, якія ўтвараюцца ў выніку асвятлення паўправадніка святлом.

**34.1.** Крышталі спажыўнай солі NaCl маюць простую кубічную рашотку. Вылічыць пастаянную рашоткі. Шчыльнасць спажыўнай солі  $\rho = 2164$  кг/м<sup>3</sup>.

**34.2.** Шчыльнасць крышталя кальцыю  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$  складае 1550 кг/м<sup>3</sup>. Знайсці параметр і адлегласць паміж бліжэйшымі суседнімі атамамі крышталя. Лічыць, што крышталічная рашотка кальцыю мае гранецэнтрыраваную кубічную сінгонію.

**34.3.** Калій мае кубічную аб'ёмацэнтрыруемую рашотку. Вылічыць пастаянную крышталічнай рашоткі калію, калі яго шчыльнасць  $\rho = 860$  кг/м<sup>3</sup>.

**34.4.** Выпраменьванне падае на плоскасць крышталя NaCl. Найменшы вугал, пры якім назіраецца максімум,  $17^\circ$ . Напружанне на трубцы дастаткова вялікае, каб узбудзілася K-серыя элемента. Вызначыць матэрыял антыкатада. Улічваць толькі  $K_\alpha$ -лініі.

**34.5.** У медным правадніку плошчай  $S = 0,4$  см<sup>2</sup> сіла току 1,5 А. Знайсці сярэднюю скорасць дрэйфу электронаў, калі канцэнтрацыя носбітаў зарада  $n = 8,4 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>.

**34.6.** У серабры аб'ёмам 1 м<sup>3</sup> знаходзіцца прыкладна  $5,8 \cdot 10^{28}$  электронаў праводнасці. Знайсці сярэднюю скорасць дрэйфу электронаў пры накладанні напружанасці электрычнага поля ўздоўж правадніка  $E = 1$  В/см.

**34.7.** Лічачы, то кожны атам медзі ў цвёрдым стане аддае ў зону праводнасці адзін валентны электрон, знайсці час рэлаксацыі электрона. Удзельнае супраціўленне медзі  $\rho = 17,2$  нОм·м.

**34.8.** Канцэнтрацыя свабодных электронаў жалеза  $n = 8,5 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup> і яго ўдзельнае супраціўленне пры тэмпературы  $20^\circ\text{C}$ .  $\rho = 9,71 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Знайсці пры той жа тэмпературы час рэлаксацыі, сярэднюю даўжыню свабоднага прабегу электронаў і іх рухомасць.

34.9. У класічнай электроннай тэорыі металаў выводзіцца закон Відэмана—Франца  $\kappa/\gamma = 3(k/e)^2T$  і закон Лорэнца  $\kappa/\gamma = 2(k/e)^2T$ . Знайсці адносныя хібнасці пры вылічэнні велічыні  $\kappa/\gamma$  па гэтых дзвюх формулах.

34.10. Знайсці ўдзельнае супраціўленне германіевага паўправадніка  $p$ -тыпа пры шчыльнасці дзірак  $n_p = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  і параўнаць яго з супраціўленнем паўправадніка  $n$ -тыпа з германія. Рухомасць дзірак  $b_p = 0,18 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , электронаў  $b_n = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

34.11. Якая канцэнтрацыя носьбітаў зараду ўласнага германію пры тэмпературы  $27^\circ \text{С}$ , калі ўдзельнае супраціўленне яго  $0,47 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а рухомасць электронаў  $b_n = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  і дзірак  $b_p = 0,18 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ?

34.12. Шырыня забароненай зоны алмазу  $\Delta E = 6 \text{ эВ}$ . Знайсці доўгахвалевую мяжу паглынання святла алмазам.

34.13. У колькі разоў зменіцца электраправоднасць чыстага германію пры павышэнні тэмпературы ад  $-23^\circ \text{С}$  да  $+27^\circ \text{С}$ ? Шырыня забароненай зоны для германію роўная  $\Delta E = 0,74 \text{ эВ}$ .

34.14. Знайсці тэмпературную залежнасць удзельнага супраціўлення для ўласнай праводнасці паўправадніка, што  $\Delta E \gg kT$ .

34.15. Пры тэмпературы  $T_1$  для паўправадніка з уласнай праводнасцю супраціўленне  $R_1$ , а пры  $T_2 - R_2$  ( $T_2 > T_1$ ). Знайсці шырыню забароненай зоны.

34.16. Вывесці формулу для тэмпературнага каэфіцыента супраціўлення паўправаднікоў  $\alpha$  з уласнай праводнасцю.

34.17. Шырыня забароненай зоны для германію пры тэмпературы  $300 \text{ К}$  роўная  $1,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Знайсці каэфіцыент супраціўлення.

34.18. Удзельнае супраціўленне германію пры  $27^\circ \text{С}$   $\rho = 0,47 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . Знайсці шырыню забароненай зоны для германію. Прыняць для германію  $\sigma_0 = 7,63 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

34.19. У колькі разоў канцэнтрацыя носьбітаў току ў чыстым сплаве  $\text{InSb}$  пры тэмпературы  $T_2 = 400 \text{ К}$  большая за канцэнтрацыю пры  $T_1 = 300 \text{ К}$ ? Шырыня забароненай зоны для  $\text{InSb}$   $\Delta E = 0,18 \text{ эВ}$ .

34.20. Знайсці электраправоднасць германію, калі вядома, што ў ім утрымліваецца індый канцэнтрацыяй  $10^{22} \text{ м}^{-3}$  і сурма канцэнтрацыяй  $10^{21} \text{ м}^{-3}$ . Прыняць рухомасць у германіі электронаў  $b_n = 0,38 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  і дзірак  $b_p = 0,18 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

34.21. Вада пры тэмпературы  $0^\circ \text{С}$  пакрыта слоem лёду таўшчынёй  $30 \text{ см}$ . Знайсці колькасць цяпла, якое перадаецца вадой за  $30 \text{ мін}$  праз паверхню лёду, плошча якога  $5 \text{ м}^2$ . Тэмпература паветра  $20^\circ \text{С}$ . Цеплаправоднасць лёду  $2,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

34.22. Паказаць, што пры высокіх тэмпературах з ураўнення малярнай цеплаёмістасці крышталяў у квантавай тэорыі цеплаёмістасці Эйнштэйна вынікае эмпірычны закон Дзюлонга і Пці.



34.23. Выкарыстоўваючы ўраўненне Эйнштэйна для малярнай цеплаёмістасці крышталю, атрымаць выражэнне для цеплаёмістасці пры нізкіх тэмпературах.

34.24. Параўнайце малярную цеплаёмістасць крышталю паводле квантавай тэорыі цеплаёмістасці Эйнштэйна з малярнай цеплаёмістасцю паводле закону Дзюлонга і Пці. Характарыстычная тэмпература Эйнштэйна  $\theta_E = T$ .

34.25. Знайсці малярную энергію нулявых хваляў крышталю, для якога характарыстычная тэмпература Дэбая  $\theta_D = 320$  К.

34.26. Характарыстычная тэмпература Дэбая для хларыду калію  $\theta_D' = 230$  К, а для хларыду натрыю  $\theta_D'' = 280$  К. У колькі разоў удзельная цеплаёмістасць КСІ большая за ўдзельную цеплаёмістасць NaCl пры тэмпературы 40 К?

34.27. Паказаць, што пры высокіх тэмпературах з ураўнення Дэбая для малярнай цеплаёмістасці крышталю вынікае закон Дзюлонга і Пці.

34.28. Выкарыстоўваючы ўраўненне Дэбая для малярнай цеплаёмістасці крышталю, атрымаць выражэнне цеплаёмістасці пры нізкіх тэмпературах.

34.29. Выкарыстоўваючы рашэнне задачы 34.28, устанавіць малярную цеплаёмістасць свінцу пры  $T = 20$  К. Характарыстычная тэмпература Дэбая  $\theta_D = 90$  К.

34.30. Характарыстычная тэмпература Эйнштэйна для медзі  $\theta_E = 316$  К. Знайсці пастаянную квазіпружкай сілы.

34.31. Якая верагоднасць таго, што электрон пры тэмпературы  $27^\circ$  С прайдзе ў стан, які ляжыць на 0,1 эВ вышэй узроўню Фермі?

34.32. Паказаць, што верагоднасць таго, што электрон у метале мае энергію, роўную энергіі Фермі, — 0,5.

34.33. Знайсці энергію Фермі для свабодных электронаў калію пры абсалютным нулі. Лічыць, што на адзін атам прыпадае адзін свабодны электрон.

34.34. Падлічыць сярэднюю кінетычную энергію нуклона ў ядры вугляроду  ${}^12_6\text{C}$ . Дыяметр ядра прыкладна  $3 \cdot 10^{-15}$  м.

34.35. Энергія Фермі пры абсалютным нулі для натрыю роўная 3,15 эВ. Знайсці колькасць свабодных электронаў, якія прыпадаюць на адзін атам натрыю.

34.36. Канцэнтрацыя свабодных электронаў праводнасці ў металах  $n = 5 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Знайсці сярэдняе значэнне энергіі свабодных электронаў пры абсалютным нулі.

34.37. Знайсці максімальную скорасць электронаў у метале пры абсалютным нулі, калі ўзровень Фермі  $E_F = 5$  эВ.

34.38. Выкарыстоўваючы ўмовы задачы 34.37, знайсці сярэднюю квадратычную скорасць свабодных электронаў у метале праз іх максімальную скорасць.

34.39. Канцэнтрацыя свабодных электронаў натрыю  $n = 3,0 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Знайсці скорасць электронаў на ўзроўні Фермі пры абсалютным нулі.

34.40. Устаноўце цеплаёмістасць электронаў праводнасці для натрыю пры тэмпературах 2 К і 1000 К. Канцэнтрацыя свабодных электронаў  $n = 2,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . Энергія Фермі  $E_F = 7 \text{ эВ}$ .

34.41. Знайсці цеплаёмістасць электронаў праводнасці адзінкі аб'ёму медзі пры тэмпературы 200 К. Энергія Фермі для медзі  $E_F = 7 \text{ эВ}$ . Прыняць, што канцэнтрацыя электронаў роўная колькасці атамаў у адзінцы аб'ёму.

34.42. Паўправадніковы прэпарат мае форму куба са стараной  $a$ . Вядомае яго супраціўленне пры адсутнасці асвятлення  $R_0$  і пры наяўнасці асвятлення  $R$ . Знайсці канцэнтрацыю электронаў і дзірак, абумоўленых асвятленнем. Лічыць, што  $\Delta n = \Delta p$ .

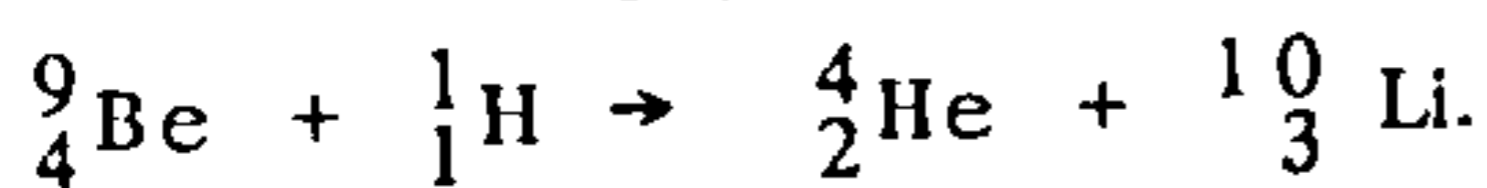
## § 35. ФІЗІКА АТАМНАГА ЯДРА

Радыус ядра

$$R = R_0 A^{1/3},$$

дзе  $R_0$  — каэфіцыент прапарцыянальнасці, які магчыма лічыць для ўсіх ядзер пастаянным і роўным  $1,4 \cdot 10^{-15} \text{ м}$ ;  $A$  — масавы лік (лік нуклідаў у ядры).

Сімвалічна ядзерную рэакцыю можна запісаць:



Закон захавання:

$$\text{ліку нуклонаў } A_1 + A_2 = A_3 + A_4;$$

$$\text{зараду } Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4;$$

$$\text{рэлятывісцкай поўнай энергіі } E_1 + E_2 = E_3 + E_4;$$

$$\text{імпульсу } \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4.$$

Калі агульны лік ядзер і часцінак, якія ўтварыліся ў выніку рэакцыі, большы за два, тады запіс адпаведна дапаўняецца.

Энергія сувязі ядра

$$E_{\text{св}} = \Delta m c^2,$$

дзе  $c^2$  — каэфіцыент прапарцыянальнасці:  $c^2 = 8,99 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг} = 8,99 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

Дэфект масы ядра

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - \frac{A}{Z} m_{\text{я}},$$

дзе  $Z$  — зарадавы лік;  $m_p$  — маса пратона;  $m_n$  — маса нейтрона.

Калі ўзяць не масу ядра  $\frac{A}{Z} m_{\text{я}}$ , а масу атама  $\frac{A}{Z} m_{\text{а}}$  і замест масы пратона  $m_p$  запісаць масу атама вадароду  $m_{\text{H}}$ , то

$$\Delta m = Z m_{\text{H}} + (A - Z) m_{\text{H}} - \frac{A}{Z} m_{\text{а}}.$$

Удзельная энергія сувязі (энергія сувязі на нуклон)

$$E_{\text{уд}} = E_{\text{с}} / A.$$

Закон радыёактыўнага распаду:



$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

дзе  $N_0$  — колькасць радыёактыўных атамаў у пачатковы момант часу ( $t = 0$ );  $N$  — іх колькасць да моманту  $t$ ;  $\lambda$  — пастаянная радыёактыўнага распаду.

Перыяд паўраспаду

$$T = \ln 2 / \lambda.$$

Колькасць атамаў, якія распаліся за час  $t$ ,

$$\Delta N = N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\lambda t}).$$

Колькасць атамаў, якія змяшчаюцца ў радыёактыўным ізатопе,

$$N = \frac{m}{M} N_A,$$

дзе  $m$  — маса ізатопа;  $M$  — яго малярная маса;  $N_A$  — лік Авагадра.

Актыўнасць радыёактыўнага прэпарату

$$a = -dN/dt = \lambda N,$$

або

$$a = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = a_0 e^{-\lambda t},$$

дзе  $a_0$  — пачатковая актыўнасць.

## Эксперыментальныя метады ядзернай фізікі

35.1. У камеры Вільсана аб'ёмам  $8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  знаходзіцца вада пры тэмпературы  $25^\circ \text{ С}$ . Знайсці масу вады, якой дастаткова для насычэння парай камеры. Ціск пары  $p = 3,44 \text{ Па}$ .

35.2. Камера Вільсана напоўнена сумессю паветра — вадзяная пара. Знайсці тэмпературу ў камеры адразу пасля яе хуткага пашырэння. Тэмпература сценак камеры  $25^\circ \text{ С}$ . Для сумесі  $\gamma = C_p / C_V = 1,4$ . Тэмпературны каэфіцыент аб'ёмнага пашырэння  $k = V_2 / V_1 = 1,2$  ( $V_1$  — пачатковы аб'ём камеры,  $V_2$  — канечны аб'ём камеры).

35.3. У камеры Вільсана адразу пасля расшырэння насычанай пары з ціскам  $p_1$  ствараецца перасычаная пара з ціскам  $p_2$ . Знайсці выражэнне для перанасычэння  $s = \rho_1 / \rho_2$  ( $\rho_1$  і  $\rho_2$  — шчыльнасць пары да і пасля расшырэння) у залежнасці ад  $p_1$  і  $p_2$ , тэмпературнага каэфіцыента расшырэння  $k = V_2 / V_1$  і  $\gamma = C_p / C_V$ .

35.4. У вадкаснавадароднай пузырковай камеры знаходзіцца пры тэмпературы  $30^\circ \text{ С}$  бурбалка ў стане няўстойлівай раўнавагі (так званы крытычны радыус  $r_{кр}$ ). Вылічыць гэты радыус. Паверхневае нацяжэнне вадароду  $\sigma = 97 \text{ нН/м}$ . Ціск вадкасці і ціск насычанай пары вадкаснага вадароду  $p_v = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$  і  $p_n = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$  адпаведна.

35.5. Камера Вільсана знаходзіцца ў магнітным полі напружанасцю  $H = 10\,000 \text{ Э}$ . Электрон у камеры пакідае след. Вызначыць яго энергію. Радыус крывізны  $2 \text{ м}$ .

35.6. Электрон, які валодае кінетычнай энергіяй  $E_k = 300$  МэВ, уляцеў у камеру Вільсана і пакінуў след у выглядзе дугі акружнасці. Камера знаходзіцца ў аднародным магнітным полі індукцыяй  $B = 10$  Тл. Знайсці радыус акружнасці.

35.7. Радыус крывізны траекторыі электрона і пазітрона, утвораных у камеры Вільсана фатомам энергіяй 6,00 МэВ, роўны 3,5 см. Якая індукцыя магнітнага поля, у якім знаходзіцца камера Вільсана?

35.8. Сінхрафазатрон надае пратомам кінетычную энергію 10 ГэВ. У колькі разоў рэлятывісцкая маса пратона большая за масу спакою?

35.9. Іанізуючыя часцінкі праходзяць праз фатаграфічную эмульсію. Яны дзейнічаюць на крышталі бромістага серабра так, што пасля праяўлення ўтвараюць рад чорных зярнят галоіднага серабра, якія знаходзяцца ўздоўж траекторыі. Як знайсці напрамак руху часцінкі па яе следзе ў эмульсіі?

35.10. У магнітным полі цыклатрона пад дзеяннем рознасці патэнцыялаў паміж дуантамі адбываецца рух пратонаў. Колькі абаротаў яны павінны рабіць, каб іх маса ўзрасла на 5 % у параўнанні з масай нерухомых пратонаў? Паміж дуантамі пратоны праходзяць заўсёды пры максімальнай рознасці патэнцыялаў, роўнай 30 кВ.

35.11. Іанізацыйная камера дыяметрам  $d = 8$  см напоўнена паветрам пры ціску  $1 \cdot 10^5$  Па. Вызначыць колькасць касмічных часцінак, якія прайшлі праз камеру, калі змяненне патэнцыялу збіраючага электрона складала  $\Delta\varphi = 2$  В. Ёмістасць электрона  $C = 10$  пФ. У сярэднім у паветры на адлегласці 1 см адна касмічная часцінка стварае 60 пар іонаў. Часцінкі падаюць нармальна да восі камеры.

### Будова атамнага ядра

35.12. Колькі пратонаў і нейтронаў утрымліваецца ў ядрах ізатопаў вугляроду: 1)  ${}^1_6\text{C}$ ; 2)  ${}^{11}_6\text{C}$ ; 3)  ${}^{12}_6\text{C}$ ; 4)  ${}^{13}_6\text{C}$ ; 5)  ${}^{14}_6\text{C}$ ; 6)  ${}^{15}_6\text{C}$ ?

35.13. У колькі разоў радыус ядра ўрану  ${}^{238}_{92}\text{U}$  большы за радыус ядра атама вадароду?

35.14. Знайсці адносіны сячэння  $\sigma_1 / \sigma_2$  ядзер свінцу  ${}^{207}_{82}\text{Pb}$  і жалеза  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ .

35.15. Знайсці шчыльнасць ядзернага рэчыва. Лічыць, што ў ядры з масавым лікам  $A$  усе нуклоны (нейтроны і пратоны) шчыльна ўпакаваны ў межах яго радыуса.

35.16. Радыус Сонца 6,95 Мм, сярэдняя шчыльнасць  $1410$  кг/м<sup>3</sup>. Якім быў бы радыус Сонца, калі пры той жа масе яго шчыльнасць раўнялася б шчыльнасці ядзернага рэчыва?

35.17. Вылічыць энергію сувязі ядра бору  ${}^{11}_5\text{B}$ .

35.18. Энергія сувязі дэйтрона (ядра цяжкага вадароду) 2,2 МэВ. Уста-



навіць масу ядра і масу нейтральнага атама ў атамных адзінках масы.

35.19. Вылічыць энергію сувязі ядзер  ${}^3_1\text{H}$  і  ${}^3_2\text{He}$ . Якое з гэтых ядзер найбольш устойлівае?

35.20. Знайсці энергію сувязі ядзер ўрану  ${}^{235}_{92}\text{U}$  і  ${}^{238}_{92}\text{U}$ . Якое з гэтых ядзер найбольш устойлівае?

35.21. Вызначыць энергію сувязі, якая прыпадае на адзін нуклон, у ядры берылію  ${}^9_4\text{Be}$ .

35.22. Параўнайце энергію сувязі, якая прыпадае ў сярэднім на адзін нуклон, у ядрах дэйтэрыю  ${}^2_1\text{H}$ , жалеза  ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ , ксенону  ${}^{131}_{54}\text{Xe}$  і ўрану  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

35.23. радыёактыўны ізатоп вісмуту  ${}^{210}_{83}\text{Bi}$  выпраменьвае  $\gamma$ -кванты энергіяй  $\epsilon = 1,0$  МэВ. Знайсці энергію, якая выпраменьваецца за  $t = 3$  мін ізатопам вісмуту масай  $m = 3$  г. Лічыць, што пры кожным акце распаду выпраменьваецца адзін  $\gamma$ -фатон з названай энергіяй.

### Закон радыёактыўнага распаду

35.24. Прэпарат утрымлівае 1000 радыёактыўных атамаў з перыядам паўраспаду  $T$ . Колькі атамаў застанецца праз прамежак часу  $T/2$ ?

35.25. Прэпарат радыёактыўнага радону  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  утрымлівае  $10^{10}$  радыёактыўных атамаў з перыядам паўраспаду 3,825 сут. Колькі атамаў распадзецца за суткі?

35.26. Вызначыць пастаянную радыёактыўнага распаду радыю  ${}^{226}_{86}\text{Ra}$ . Якая доля ад першапачатковай колькасці атамаў распадзецца за 3100 гадоў?

35.27. Праз які час распадзецца 75 % наяўных атамаў прэпарата палонію  ${}^{210}_{84}\text{Po}$ , калі бесперапынна выдаляць радыёактыўныя прадукты распаду?

35.28. За які час адбудзецца распад палонію  ${}^{210}_{84}\text{Po}$  масай 2 мг, калі ў пачатковы момант яго маса 0,2 г?

35.29. Вызначыць перыяд паўраспаду вісмуту  ${}^{210}_{83}\text{Bi}$ , калі вядома, што вісмут масай 1,0 г вылучае  $4,58 \cdot 10^{15}$   $\beta$ -часцінак за 1 с.

35.30. Колькі ядзер распадзецца за 1 с у прэпараце радыёактыўнага ізатопа ірыдыю  ${}^{192}_{77}\text{Ir}$  і колькі атамаў застанецца праз 30,0 сут., калі першапачатковая яго маса 5,0 г?

35.31. Колькі  $\alpha$ -часцінак выкідвае торый  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  масай 1 г за 1 с?

35.32. радыёактыўны прэпарат, які мае актыўнасць  $3,7 \cdot 10^9 \text{с}^{-1}$ , змешчаны ў каларыметр цеплаёмістасцю 4,19 Дж/К. Знайсці павелічэнне тэмпературы ў каларыметры за 1 гадзіну, калі вядома, што дадзенае радыёактыўнае рэчыва выпраменьвае  $\alpha$ -часцінкі энергіяй 5,3 МэВ.

35.33. Флуарэсцыруючы экран плошчай  $0,03 \text{см}^2$  знаходзіцца на адлег-

ласці 1 см ад пылінкі радыю  ${}_{86}^{226}\text{Ra}$  масай 18 пг. Колькі ўспышак за 1 мін будзе на экране?

35.34. Крупінка, якая змяшчае рады  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ , знаходзіцца на адлегласці 1,2 см ад флуарэсцыруючага экрана. Якую масу мае крупінка, калі на працягу 1 мін на плошчы экрана  $0,602\text{ см}^2$  зарэгістравана 47 сцынцыляцый? (Прадукты распаду вельмі хутка адпампоўваюцца.)

35.35. Хвораму ўвялі ўнутрывенна раствор аб'ёмам  $1\text{ см}^3$ , што змяшчае штучны радыёізатоп натрыю  ${}_{11}^{24}\text{Na}$  актыўнасцю  $a_0 = 2000\text{ с}^{-1}$ . Актыўнасць крыві аб'ёмам  $1\text{ см}^3$ , узятай праз 5 хвілін, аказалася  $a = 0,27\text{ с}^{-1}$ . Знайсці аб'ём крыві чалавека.

35.36. Месцанараджэнням радыёактыўных элементаў заўсёды спада-рожнячае свінец — канечны прадукт іх распаду. Вядома, што торыевы рад заканчваецца ізатопам свінцу  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ . Лічачы ўзрост торыевай руды  $4 \cdot 10^9$  гадоў, вызначыць, колькі свінцу будзе ў гэтай рудзе на 1 кг торыю  ${}_{90}^{232}\text{Th}$ .

35.37. Элемент торыю  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  у выніку радыёактыўнага распаду ператвараецца ў ізатоп свінцу  ${}_{82}^{208}\text{Pb}$ . Колькі  $\alpha$ - і  $\beta$ -часцінак выкідваецца пры гэтым кожным атамам?

35.38. Радыёактыўны элемент нептунію  ${}_{93}^{241}\text{Np}$  з'яўляецца пачынальнікам штучна атрыманай сям'і нептунію. Ён у выніку распаду пераўтвараецца ў стабільны ізатоп вісмуту  ${}_{83}^{209}\text{Bi}$ . Знайсці колькасць  $\alpha$ - і  $\beta$ -распадаў.

35.39. Радыёактыўны ізатоп крэмнію  ${}_{14}^{27}\text{Si}$  распадаецца і пераўтвараецца ў алюміній  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ . Якая часцінка пры гэтым выкідваецца?

35.40. У які элемент пераўтвараецца ўран  ${}_{92}^{238}\text{U}$  пасля трох  $\alpha$ - і двух  $\beta$ -пераўтварэнняў?

35.41. Рэчыва радыёактыўнага элемента падвяргаецца шэрагу пераўтварэнняў, у выніку чаго ён страчвае адну  $\alpha$ - і дзве  $\beta$ -часцінкі і пераўтвараецца ў ядро ўрану  ${}_{92}^{235}\text{U}$ . Знайсці зыходны радыёактыўны элемент.

35.42. У які элемент пераўтвараецца рады  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  пасля пяці  $\alpha$ - і чатырох  $\beta$ -распадаў?

35.43. Рады масай 1 г выпраменьвае за 1 с  $3,7 \cdot 10^{10}$   $\alpha$ -часцінак, якія валодаюць скорасцю  $v = 15\text{ Мм/с}$ . Знайсці поўную энергію, якая выдзелілася пры  $\alpha$ -распадзе за 1 мін.

#### Актыўнасць. Радыёактыўная раўнавага

35.44. Радыёактыўны ёд  ${}_{53}^{126}\text{I}$  мае масу  $m = 0,2\text{ мг}$ . Знайсці актыўнасць праз 1 гадз. Лічыць, што ўсе ізатопы радыёактыўныя.

35.45. Удзельная актыўнасць ізатопа вугляроду  ${}_{6}^{14}\text{C}$  старых драўляных



прадметаў складае  $\frac{3}{5}$  удзельнай актыўнасці гэтага ізатопа ў толькі што ссечаных дрэў. Знайсці ўзрост старых драўляных прадметаў.

35.46. Атамы радыёактыўнага ізатопа распадаюцца на працягу 20 с. Знайсці колькасць атамаў, якія распаліся. Лічыць, што актыўнасць ізатопа  $a = 0,1$  МБк.

35.47. Маса прэпарата радыёактыўнага радону  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$  роўная 1 г. Знайсці пачатковую актыўнасць прэпарата і яго актыўнасць праз 50 с. Лічыць, што ўсе атамы прэпарата радыёактыўныя.

35.48. Колькі ядраў распадаецца за 1 с у кавалку ўрану  ${}^{238}_{92}\text{U}$  масай 1,0 кг? Якая актыўнасць гэтага ўрану?

35.49. Сцынцыляцыйныя лічылнікі выкарыстоўваюцца для рэгістрацыі  $\gamma$ -хваляў. Знайсці эфектыўнасць рэгістрацыі  $\gamma$ -хваляў, калі яна роўная 100 %.

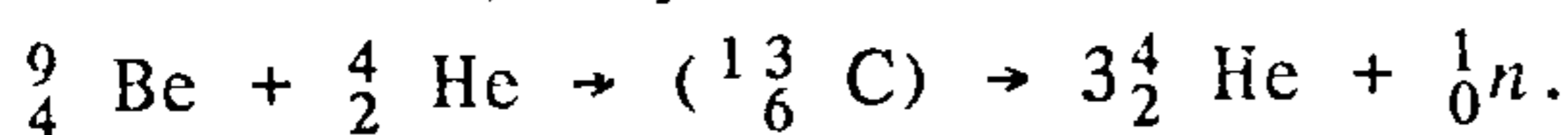
35.50. Знайсці масу стронцыю  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ , які мае такую ж актыўнасць, як фосфар  ${}^{32}_{15}\text{P}$  масай 1 мг.

35.51. Пунктавая ізатропная радыёактыўная крыніца мае актыўнасць  $a = 100$  ГБк. Знайсці інтэнсіўнасць  $\gamma$ -выпраменьвання на адлегласці 100 см ад крыніцы. Лічыць, што пры кожным акце распаду выпраменьваецца ў сярэднім  $n = 2$   $\gamma$ -фатоны энергіяй  $\epsilon = 0,51$  МэВ кожны.

### Ядзерныя рэакцыі

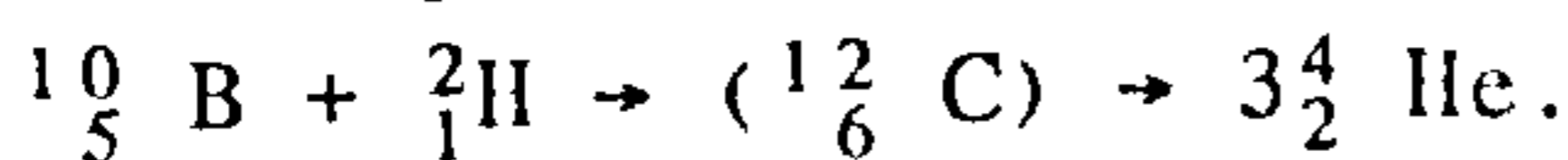
35.52. Пры абстрэле  $\alpha$ -часцінкамі ядра азоту  ${}^1_7\text{N}$  магчымы захоп такой часцінкі ядром атама. На імгненне ўтвараецца надзвычай няўстойлівае ядро фтору, якое адразу ж распадаецца і ператвараецца ва ўстойлівае ядро кіслароду. Гэтая ядзерная рэакцыя была ўпершыню ажыццёўлена ў 1919 г. Рэзерфордам. Напісаць ураўненне ядзернай рэакцыі і вызначыць, вылучаецца ці паглынаецца энергія пры гэтай рэакцыі. Знайсці энергію, якая вылучаецца ці паглынаецца ў выніку рэакцыі.

35.53. Знайсці энергію, якая паглынаецца пры ядзернай рэакцыі



35.54. Ядро берылію  ${}^9_4\text{Be}$ , захопліваючы дэйтрон, ператвараецца ў ядро бору  ${}^{10}_5\text{B}$ . Напісаць ураўненне рэакцыі і ўстанавіць энергію, якая вылучаецца.

35.55. Пры абстрэле ядзер атамаў бору  ${}^{10}_5\text{B}$  ядрамі цяжкага вадароду  ${}^2_1\text{H}$  узнікае ядзерная рэакцыя



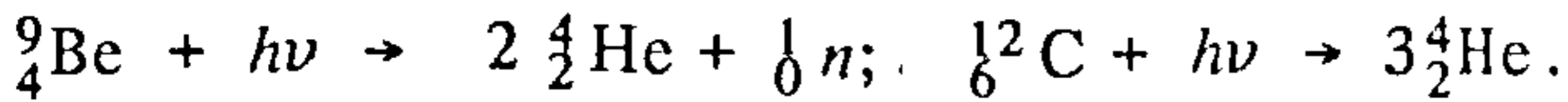
Вызначыць энергію, якая вылучаецца пры гэтым ператварэнні.

35.56. Ядро літыю  ${}^7_3\text{Li}$ , захопліваючы пратон, распадаецца на дзве  $\alpha$ -

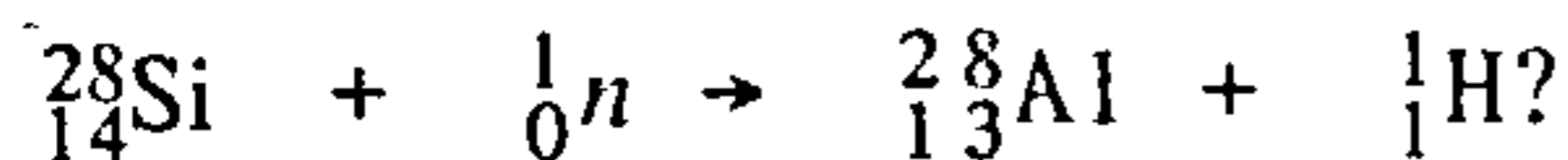
часцінкі. Напісаць ядзерную рэакцыю і вызначыць энергію, якая вылучаецца пры гэтай рэакцыі.

35.57. Атамы літыю  ${}^7_3\text{Li}$  бамбардзіруюцца пратоінамі, кінетычная энергія якіх 1 МэВ. Дзве  $\alpha$ -часцінкі, якія пры гэтым утвараюцца, ляцяць з аднолькавай скорасцю. Вызначыць кінетычную энергію гэтых часцінак.

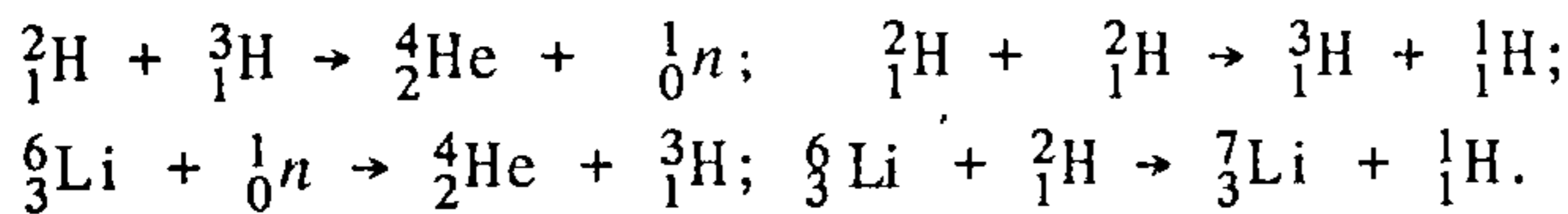
35.58. Вызначыць мінімальную энергію  $\gamma$ -квантаў, неабходную для расшчаплення ядзер берылію і ядзер вугляроду па рэакцыях:



35.59. Якой мінімальнай кінетычнай энергіяй павінен валодаць нейтрон, каб мець магчымасць пры сутыкненні з ядром крэмнію  ${}^{28}_{14}\text{Si}$  выклікаць ядзерную рэакцыю



35.60. Знайсці энергію, якая вылучаецца пры наступных тэрмаядзерных рэакцыях:



35.61. Французскія вучоныя Ірэн і Фрэдэрык Жоліо-Кюры, якія адкрылі штучную радыёактыўнасць, бамбардзіравалі  $\alpha$ -часцінкамі бор  ${}^{10}_5\text{B}$ , алюміній  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  і магній  ${}^{24}_{12}\text{Mg}$ . Напісаць ядзерныя рэакцыі.

35.62. Ядро бору  ${}^{10}_5\text{B}$  можа захопліваць нейтрон, у выніку чаго адбываецца расшчапленне ядра бору на ядры літыю і гелію. Напісаць ядзерную рэакцыю і вызначыць энергію, якая вызваляецца пры гэтай рэакцыі.

35.63. Пры апраменьванні нейтронамі атамаў  ${}^{23}_{11}\text{Na}$  апошні ператвараецца ў радыёактыўны ізатоп  ${}^{24}_{11}\text{Na}$  з перыядам паўраспаду 15,3 гадзіны. Якая доля першапачатковай масы радыёактыўнага натрыю будзе праз 30,6 гадз. пасля спынення апраменьвання нейтронамі?

35.64. Пры апраменьванні  $\alpha$ -часцінкамі алюмінію  ${}^{27}_{13}\text{Al}$  выпускаецца нейтрон і ўтвараецца ізатоп фосфару  ${}^{30}_{15}\text{P}$ . Атрыманы ізатоп фосфару з'яўляецца радыёактыўным і распадаецца з выпусканнем пазітронаў. Гэтая рэакцыя ўтварэння пазітронна-актыўнага рэчыва была адкрыта Фрэдэрыкам Жоліо-Кюры. Напісаць гэтую рэакцыю і вызначыць энергію, якая пры ёй вылучаецца.

35.65. Ядро ўрану  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , якое выпускае  $\alpha$ -часцінку энергіяй 4,2 МэВ, ператвараецца ў ядро торыю  ${}^{234}_{90}\text{Th}$ . Вызначыць масу атама  ${}^{234}_{90}\text{Th}$ , калі маса атама ўрану  ${}^{238}_{92}\text{U}$  раўная 238,05353 атамных адзінак масы.

35.66. Вызначыць энергію, якая вызвалілася пры ўтварэнні з пратоінаў і нейтронаў гелію масай 1 г.

35.67. Колькі энергіі можна атрымаць пры расшчапленні ўрану  ${}^{235}_{92}\text{U}$



масай 1 г, калі пры дзяленні кожнага ядра на два асколкі вызваляецца энергія 200 МэВ?

35.68. Колькі энергіі вызваляецца пры ядзерным дзяленні ўрану  ${}_{92}^{235}\text{U}$  масай 1 кг ва ўранавым рэактары? Колькі вугалю неабходна спаліць для атрымання такой жа колькасці цяпла (каларыйнасць вугалю прыняць роўнай 29,3 МДж/кг)? Устанавіць, які груз можна было б падняць на вышыню 5 км за кошт энергіі, што вызваляецца пры рэакцыі дзялення. Лічыць, што сярэдняя энергія, што вылучаецца пры дзяленні аднаго ядра на два асколкі ўрану, складае 200 МэВ.

35.69. Энергія выпраменьвання Сонца ўзнікае з прычыны ланцужка ядзерных рэакцый зліцця, канечным вынікам якіх з'яўляецца ператварэнне чатырох атамаў вадароду ў адзін атам гелію. Устанавіць, колькі вады можна было б нагрэць ад  $0^\circ\text{C}$  да кіпення за кошт ператварэння ў гелій 4 г вадароду.

35.70. Ядро ўрану  ${}_{92}^{235}\text{U}$  паглынае нейтрон, які рухаецца з цеплавой скорасцю. Напісаць ураўненне рэакцыі.

35.71. Пры апраменьванні ў рэактары стабільны кобальт  ${}_{27}^{59}\text{Co}$  ператвараецца ў радыёізатоп  ${}_{27}^{60}\text{Co}$ :  ${}_{27}^{59}\text{Co} + {}_0^1n \rightarrow {}_{27}^{60}\text{Co}$ . У выніку  $\beta$ -распаду  ${}_{27}^{60}\text{Co}$  ператвараецца ў нікель  ${}_{28}^{60}\text{Ni}$ . Знайсці энергію  $\gamma$ -выпраменьвання ўтворанага ядра  ${}_{28}^{60}\text{Ni}$ .

35.72. Пры згаранні ядзернага паліва на атамнай электрастанцыі за 1 с вылучаецца прыблізна 28,5 МДж энергіі. Колькі ядзернага гаручага расходуюць станцыя за суткі, калі прыняць, што адно ядро атама ўрану  ${}_{92}^{235}\text{U}$  пры дзяленні на два асколкі вылучае 200 МэВ энергіі?

35.73. Магутнасць ўранавага рэактара  $N = 1$  МВт. Колькі ўрану  ${}_{92}^{235}\text{U}$  спажывае ён за 1 гадз., калі пры дзяленні кожнага ядра ўрану на два асколкі вылучаецца энергія  $E = 200$  МэВ?

35.74. Знайсці электрычную магутнасць атамнай электрастанцыі, якая расходуюць ўран  ${}_{92}^{235}\text{U}$  масай 0,1 кг ў суткі. ККДз станцыі 16 %. Сярэдняя энергія, якая вылучаецца пры дзяленні аднаго ядра ўрану на два асколкі, складае  $E = 200$  МэВ.

35.75. Рэактар магутнасцю 100 МВт стварае плутоній  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ . Лічыць, што ў сярэднім пры дзяленні аднаго ядра  ${}_{92}^{235}\text{U}$  утвараецца 1,5 ядра  ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ . Знайсці колькасць плутонію, атрыманага на працягу 10 сут. Сярэдняя энергія, якая вылучаецца пры дзяленні аднаго ядра ўрану на два асколкі, складае  $E = 200$  МэВ.

## § 36. ЭЛЕМЕНТАРНЫЯ ЧАСЦІНКІ

Парогавая (мінімальная) кінетычная энергія часцінкі  $m$ , якая налятае на супакоеную часцінку  $M$ , для ўзбуджэння эндэнергетычнай рэакцыі  $m + M \rightarrow m_1 + m_2 + \dots$  :

$$E_{\text{пар}} = \frac{(m_1 + m_2 + \dots)^2 - (m + M)^2}{2M} c^2,$$

дзе  $m, M, m_1, m_2, \dots$  — масы спакою адпаведных часцінак.

Квантавыя лікі, якія прыпісваюцца элементарным часцінкам:  $Q$  — электрычны зарад;  $L$  — лептонны зарад;  $B$  — барыённы зарад;  $T$  — ізатапічны спін,  $T_z$  — яго праекцыя;  $S$  — дзіўнасць;  $S = 2 < Q > - B$ ;  $Y$  — гіперзарад;  $Y = B + S$ .

Сувязь паміж квантавымі лікамі моцна ўзаемадзеючых часцінак:

$$Q = T_z + Y/2 = T_z + (B + S)/2.$$

**36.1.** Імпульсы пратонаў роўныя 1,0 і 10 ГэВ/с ( $c$  — скорасць святла). Знайсці іх кінетычныя энергіі.

**36.2.** Паказаць, што пры сутыкненні фатона са свабодным электронам ён не можа перадаць яму ўсю сваю энергію.

**36.3.** У выпадку няпругкага сутыкнення рэлятывісцкай часцінкі, кінетычная энергія якой  $E_k = m_0 c^2$ , з такой жа часцінкай, якая пакоіцца адносна нерухомай сістэмы адліку, утвараецца састаўная часцінка. Знайсці масу спакою  $m_0'$  састаўной часцінкі.

**36.4.** Якая будзе парогавая энергія  $\gamma$ -кванта, неабходная для ўтварэння пары электрон—позітрон у полі супакоенага электрона?

**36.5.** Указаць, якія з пералічаных ніжэй рэакцый забаронены законамі захавання:

- 1)  $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$ ;
- 2)  $p \rightarrow n + e^+$ ;
- 3)  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \tilde{\nu}_e$ ;
- 4)  $K^+ \rightarrow \pi^- + 2e^+$ ;
- 5)  $\pi^- + p \rightarrow \Lambda^0 + K^0$ ;
- 6)  $K^- + n \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ ;
- 7)  $\pi^+ + n \rightarrow \Lambda^0 + K^+$ ;
- 8)  $\pi^+ + n \rightarrow K^+ + K^0$ .

**36.6.** Ізатапічны спін нейтральнай элементарнай часцінкі  $T_z = +1/2$  і барыённы зарад  $B = +1$ . Знайсці дзіўнасць  $S$  і гіперзарад  $Y$  гэтай часцінкі. Што гэта за часцінка?

**36.7.** Вадародную мішэнь бамбардзіруюць адмоўнымі  $\pi^-$ -мезонамі. Вылічыць мінімальную (парогавую) кінетычную энергію  $\pi^-$ -мезона, пры якой становіцца магчымай рэакцыя



**36.8.**  $\mu^-$ -мюон адчувае пругкае лабавое сутыкненне з нерухомым электронам. Знайсці кінетычную энергію электрона аддачы, калі кінетычная энергія  $\mu^-$ -мюона да сутыкнення  $E_k = 100$  МэВ.

**36.9.** Паказаць, што нараджэнне пары электрон — позітрон адным кван-



там магчыма толькі ў тым выпадку, калі ў рэакцыі ўдзельнічае часцінка з масай спакою  $m_1 \neq 0$ .

36.10. Працэс анігіляцыі электрона  $e^-$  і пазітрона  $e^+$  адбываецца па схеме:  $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ . Знайсці вугал паміж напрамкамі разлёту  $\gamma$ -квантаў з аднолькавымі энергіямі, калі кінетычная энергія пазітрона да яго сутыкнення з нерухомым электронам  $E_k = 0,75$  МэВ.

36.11. Электрон і пазітрон, якія маюць аднолькавыя кінетычная энергіі 240 кэВ, пры сутыкненні ператварыліся ў два аднолькавыя фатоны. Устаноўце энергію кожнага фатона і адпаведную яму даўжыню хвалі.

36.12. Электрон, які рухаецца, сутыкаецца з другім электронам, што знаходзіцца ў спакоі, па схеме:

$$e^- + e^- \rightarrow e^- + e^- + e^- + e^+.$$

У выніку ўтварылася пара электрон — пратон. Якой пры гэтым энергія павінен валодаць электрон, які рухаецца?

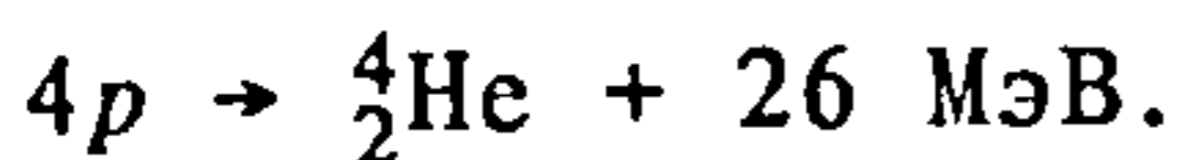
36.13. Выкарыстоўваючы ўмовы задачы 36.7, знайсці імпульс, які адпавядае кожнаму фатону.

36.14. Працэс узнікнення пары электрон — пазітрон адбываецца па наступнай схеме:  $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$ . Якую скорасць будуць мець часцінкі, што ўзніклі, калі энергія фатона  $E = 3,02$  МэВ?

36.15. Пазітрон з кінетычнай энергіяй  $E_k = 500$  кэВ налятае на свабодны электрон, які знаходзіцца ў спакоі. У выніку анігіляцыі ўзнікаюць два  $\gamma$ -кванты з аднолькавымі энергіямі. Знайсці вугал паміж напрамкамі іх разлёту.

36.16. Выкарыстоўваючы ўмовы задачы 36.12, знайсці поўную кінетычную энергію электрона і пазітрона ў момант іх нараджэння.

36.17. Магутнасць выпраменьвання Сонца прыкладна роўная  $5 \cdot 10^{26}$  Вт. Дапустым, што ўся энергія вылучаецца ў выніку ядзернай рэакцыі, якая праходзіць па пратонна-пратоннаму цыклу:



Колькі нараджаецца атамаў гелію  ${}^4_2\text{He}$  унутры Сонца ў адну секунду?

36.18. Схема распаду  $\pi^0$ -мезона на ляту:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$

Знайсці вугал паміж напрамкамі разлёту  $\gamma$ -квантаў, калі іх энергіі  $E_1$  і  $E_2$ , а маса спакою  $\pi^0$ -мезона  $m_0$ .

36.19. Нейтральны  $\pi^0$ -мезон, які знаходзіцца ў спакоі, распадаецца і ператвараецца ў два аднолькавыя  $\gamma$ -фатоны. Устаноўце энергію кожнага фатона.

36.20. Свабодны нейтрон распадаецца па схеме:  $n + p \rightarrow e^- + \bar{\nu}$ . Знайсці сумарную кінетычную энергію ўсіх часцінак, якія ўтвараюцца ў працэсе распаду нейтрона. На кінетычную энергію нейтрона і масу спакою антынейтрона не звяртаць увагі.

36.21. Адмоўны  $\mu^-$ -мюон праляцеў у нерухомай сістэме адліку ад месца свайго нараджэння да пункта распаду  $l = 4,6$  км. Знайсці ўласны час жыцця  $\mu^-$ -мюона, калі скорасць яго руху  $v = 0,99$  с.

36.22. Адмоўны  $\mu^-$ -мезон з кінетычнай энергіяй  $E_k = 60$  МэВ распадаецца на мюон і нейтрына. Вылічыць энергію нейтрына, што вылятае пад прамым вуглом да напрамку руху  $\mu^-$ -мезона.

36.23. У выніку сутыкнення пратонаў з унутранай мішэнню сінхрацыклатрона нараджаюцца  $\pi$ -мезоны. Скорасць у пучку  $\pi$ -мезонаў, якія з'яўляюцца нестабільнымі часцінкамі з перыядам паўраспаду  $25,5$  нс, складае  $180,0$  Мм/с. За які час распадецца палавіна  $\pi$ -мезонаў? Вызначыць шлях, які яны паспяваюць прайсці за гэты час.

36.24. Сярэдні час жыцця  $K^+$ -мезонаў  $\langle \tau \rangle = 12,3$  нс. Знайсці сярэдняю адлегласць, што праходзяць  $K^+$ -мезоны з кінетычнай энергіяй, якая ў  $\eta = 1,2$  раза перавышае іх энергію спакою.

36.25. Нейтральныя  $\Lambda^0$ -гіпероны пралятаюць ад месца нараджэння да месца распаду адлегласць  $l = 0,7$  м. Знайсці ўласны час жыцця гэтых часцінак. Лічыць, што кінетычная энергія  $\Lambda^0$ -гіперона  $E_k = 10$  ГэВ. Маса  $\Lambda^0$ -гіперона  $m = 1,988 \cdot 10^{-27}$  кг.

36.26. Дадатковы  $\Sigma^+$ -гіперон з кінетычнай энергіяй  $E_k = 400$  МэВ распадаецца на нейтральную часцінку і  $\pi^+$ -мезон, які вылятае з кінетычнай энергіяй  $E_k = 40$  МэВ пад прамым вуглом да першапачатковага напрамку руху гіперона. Знайсці масу спакою нейтральнай часцінкі (у МэВ).

36.27. У выніку распаду адмоўнага  $\Sigma^-$ -гіперона ( $\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$ ), што спыніўся, атрымліваецца нейтрон. Вылічыць яго кінетычную энергію.

36.28. Электрон прайшоў рознасць патэнцыялаў і набыў кінетычную энергію  $0,76$  МэВ. Устанавіць скорасць электрона.

36.29. Знайсці скорасць электрона, калі яго поўная энергія  $E = 1,02$  МэВ.

36.30. Электрон рухаецца ад зоркі да Зямлі. Ён павінен пераадолець адлегласць  $t = 10$  светлавых гадоў. Якой энергіяй павінен валодаць нейтрон, каб з верагоднасцю  $50\%$  ён мог выжыць? Перыяд паўраспаду  $T = 12$  мін.

36.31. Устанавіць скорасць электрона, які прайшоў рознасць патэнцыялаў  $1,0$  МВ.

36.32. У сценцы атамнага рэактара ёсць графітавы стрыжань. Раствлумачце, чаму праз тарэц такога стрыжня выходзяць толькі павольныя нейтроны.



# АДКАЗЫ І РАШЭННІ

## МЕХАНІКА

1.1. Пры прамалінейным руху ў адным напрамку. 1.2.  $s = 5t$ , 25 м. 1.3.

$$\langle v \rangle = \frac{4v_1v_2v_3v_4}{v_1v_2v_3 + v_2v_3v_4 + v_1v_2v_4} = 9,6 \text{ м/с.}$$

1.4. 10 м/с. 1.5.  $v_2 = (s - v_1 t) / t = 20 \text{ м/с}$ . 1.6.

$$v_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{s_1}{t_1} + \frac{s_2}{t_2} \right) = 5 \text{ м/с};$$

$$v_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{s_2}{t_2} - \frac{s_1}{t_1} \right) = 1,5 \text{ м/с.}$$

1.7.  $t_1 = t_1 t_2 / (t_1 - t_2) = 40 \text{ с}$ . 1.8.  $t_2 / t_1 = (v_1 + v_2) / (v_2 - v_1) = 1,5$ . 1.9. 8 м/с; 2 м/с. 1.10.  $t_1 = s / (v_1 - v_2) \approx 1 \text{ гадз. } 14 \text{ мін}$ ;  $t_2 = s / (v_1 + v_2) \approx 1 \text{ гадз.}$  1.11.  $v =$

$= v_2 / \text{tg} \alpha - v_1 \approx 2,3 \text{ м/с}$ . 1.12.  $t = s(\sqrt{v_1^2 - v_2^2 \sin^2 \alpha} + v_2 \cos \alpha) / (v_1^2 - v_2^2) = 1 \text{ гадз.}$

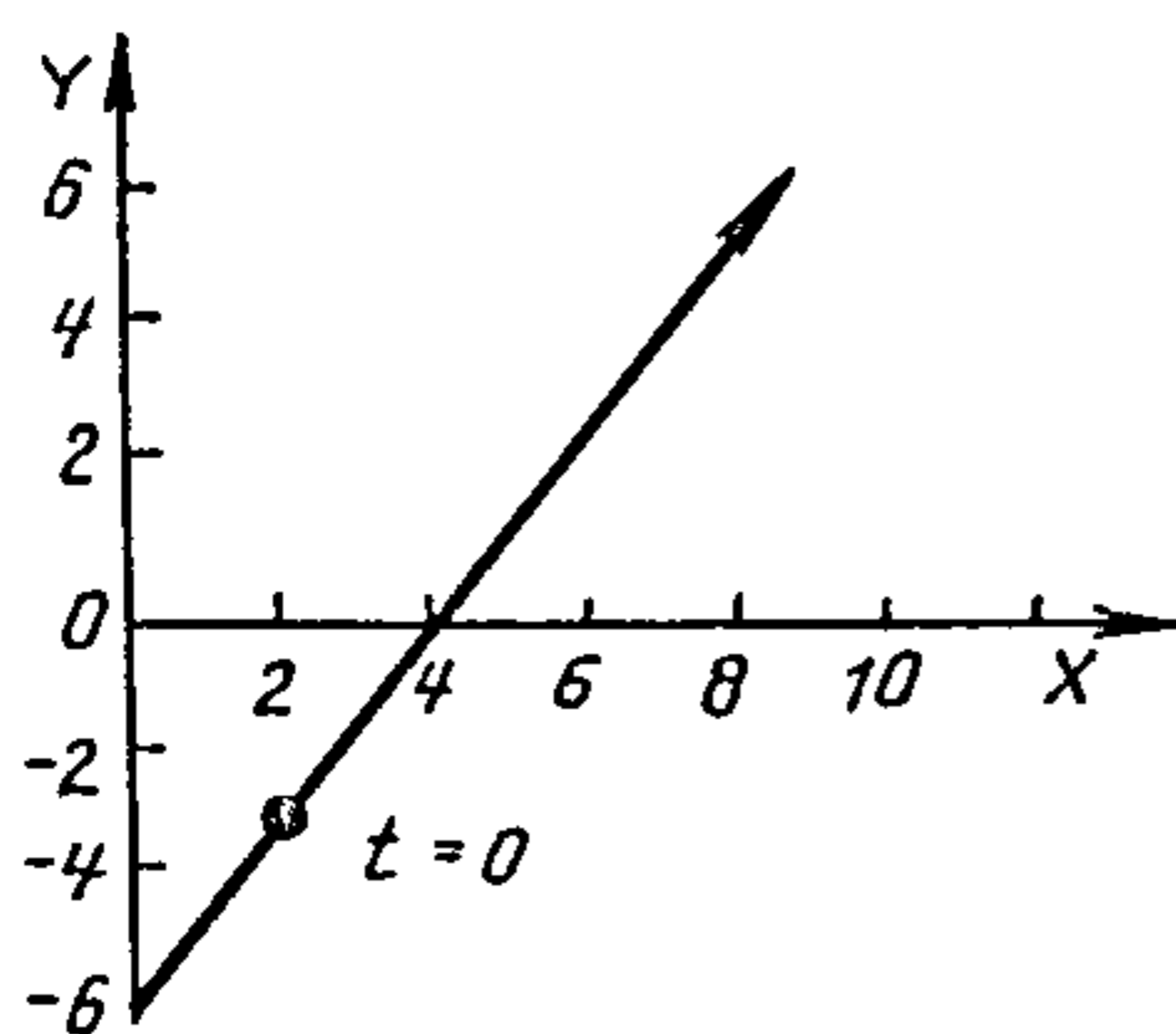
54 мін. 1.13. 1,2 м/с. 1.14.  $v_1 = \sqrt{v^2 t^2 - s^2} / t = 152 \text{ м/с}$ . 1.15.  $s = (c + v)^2 t / 2 \text{ с.}$

1.16. Другі хутчэй у  $t_1 / t_2 = \sqrt{(v_1 + v_2) / (v_1 - v_2)} = 2 \text{ разы}$ . 1.17. 7 м/с; 11,4 м/с;

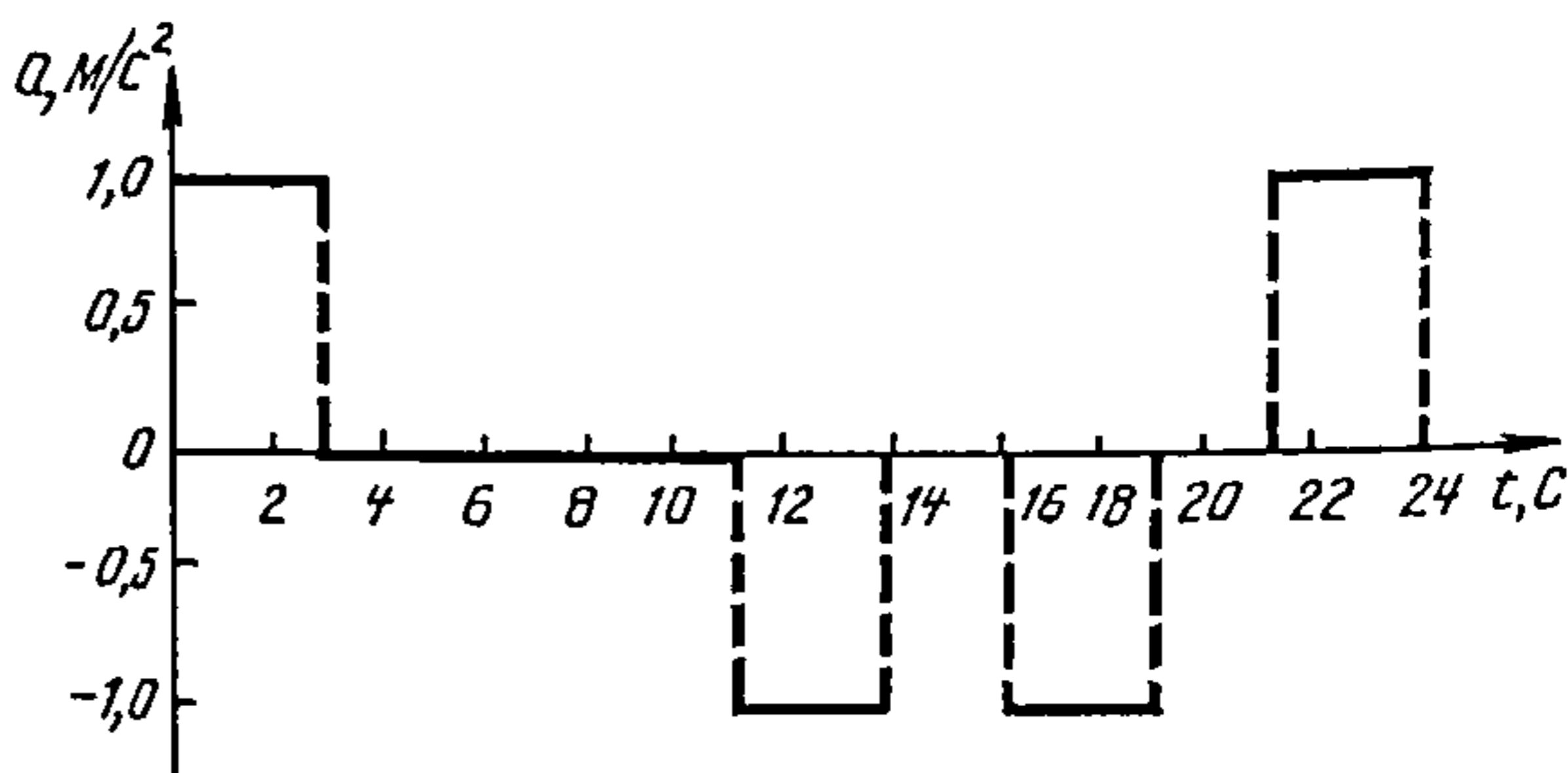
9 м/с. 1.18. Прамая  $3x - 2y = 12$ , на плоскасці  $XU$  з пачаткам у пункце  $x_0 = 2$ ,  $y_0 = -3$  (рыс. 1). 1.20. 410 м. 1.21. 28 с. 1.22. 86 м. 1.23. -2. 1.24. 18 м; 48 м.

Графік залежнасці паскарэння ліфта ад часу прыведзены на рыс. 2. 1.25. 12 с; 8,3 м/с<sup>2</sup>. 1.26.  $a = (v_2^2 - v_1^2) / 2s = 5 \text{ м/с}^2$ ;  $t = 2s / (v_1 + v_2) = 2 \text{ с}$ . 1.27.  $a =$

$$= [2s(t_1 - t_2)] / [t_1 t_2 (t_1 + t_2)] = 5 \text{ м/с}^2;$$



Рыс. 1



Рыс. 2

$$v_1 = \frac{s(2t_1 t_2 + t_2^2 - t_1^2)}{t_1 t_2 (t_1 + t_2)} = 2,5 \text{ м/с.}$$

1.28. 400 м. 1.29. 10. 1.30.  $t = h/v + v/a = 32 \text{ с.}$  1.31.  $v_0 = 0,5 \sqrt{g(8h + gt^2)} = 29 \text{ м/с.}$  1.32.

$$t = \frac{t_1}{n} - \frac{v_0}{g} \pm \sqrt{\frac{v_0^2}{g} + (1-n) \frac{t_1^2}{n^2}} = 6 \text{ с; } 78,4 \text{ м/с; } 294 \text{ м.}$$

1.33.  $t = \sqrt{2} v_0 / g = 3 \text{ с.}$  1.34. Вышыня  $n$ -га шарыка над падлогай  $h_n = 0,5 g n^2 (\Delta t)^2$ , дзе  $\Delta t$  — прамежак часу паміж двума ўдарамі. Адлегласць паміж двума суседнімі шарыкамі  $h_n - h_{n-1} = 0,5 g (\Delta t)^2 [n^2 - (n-1)^2]$ . Тады адносіна адлегласцей паміж шарыкамі

$$\frac{h_{n+1} - h_n}{h_n - h_{n-1}} = \frac{2n + 1}{2n - 1},$$

г.зн. адлегласці паміж шарыкамі адносяцца як члены рада няцотных лікаў. Адносіна адлегласцей ад шарыкаў да падлогі  $h_{n+1} / h_n = (n+1)^2 / n^2$  роўная адносіне квадратаў цэлых лікаў. 1.35.  $v_0 = gt/2 = 29 \text{ м/с.}$  1.36. 12,4 м/с. 1.37.

$a = g \operatorname{ctg} \alpha = 17 \text{ м/с}^2$ . 1.38. Парабала  $y = 2x^2$ . 1.39. 5,8 м/с; 1 м/с. 1.40.  $v = \sqrt{2gh} / (2h) \approx 200 \text{ м/с.}$  1.41.  $t = v_0 \sin \alpha / g = 8 \text{ с.}$  1.42.  $76^\circ$ . 1.44.  $45^\circ$ . 1.45.  $y = gx^2 / (2v_0^2)$ ;  $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh} = 22 \text{ м/с; } \alpha = 63^\circ$ . 1.46.

$$s = 2v_0 t \sin \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2} = 11,3 \text{ м.}$$

1.47.  $h = v_0^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta) \cos^2 \alpha / (2g) = 6,8 \text{ м.}$  1.48.

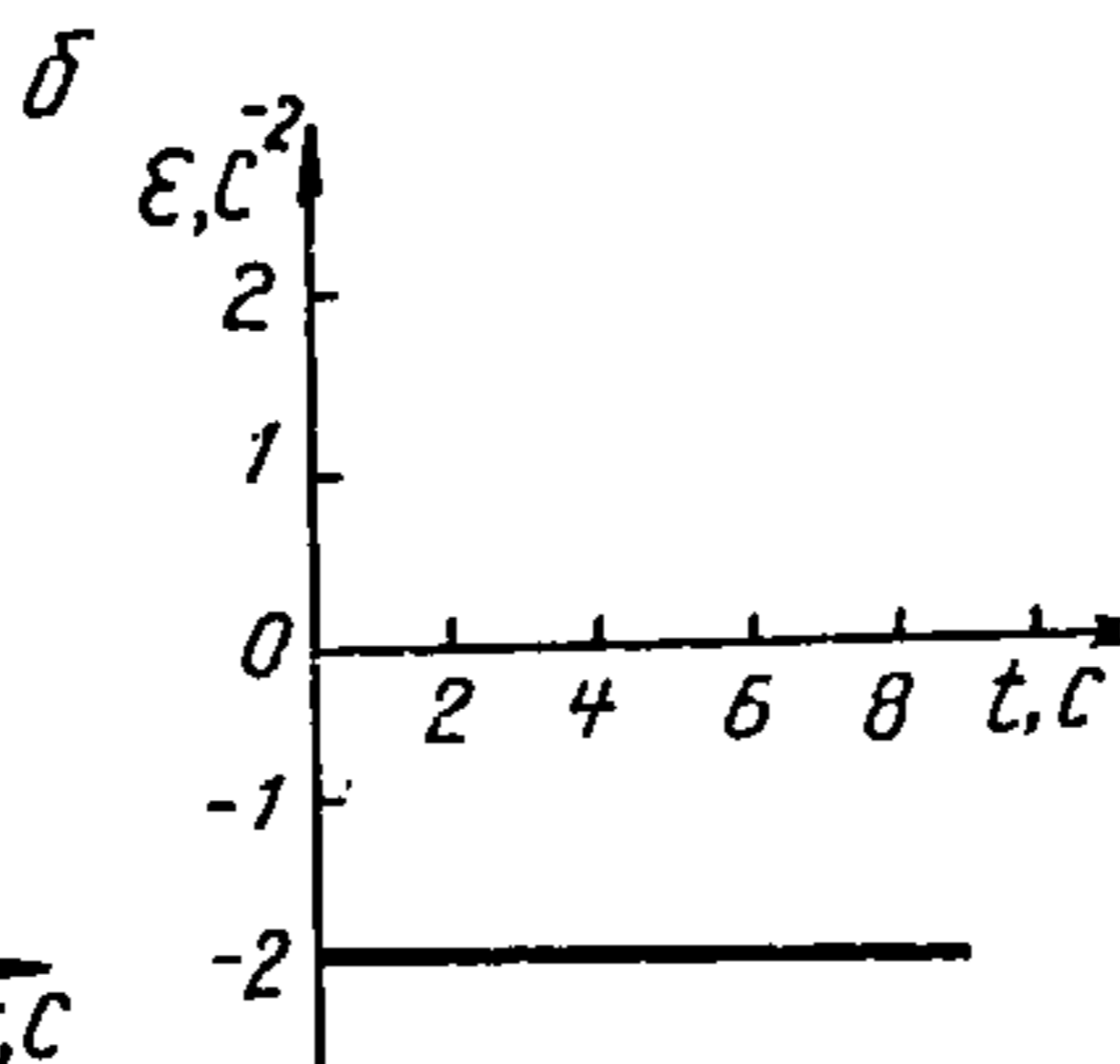
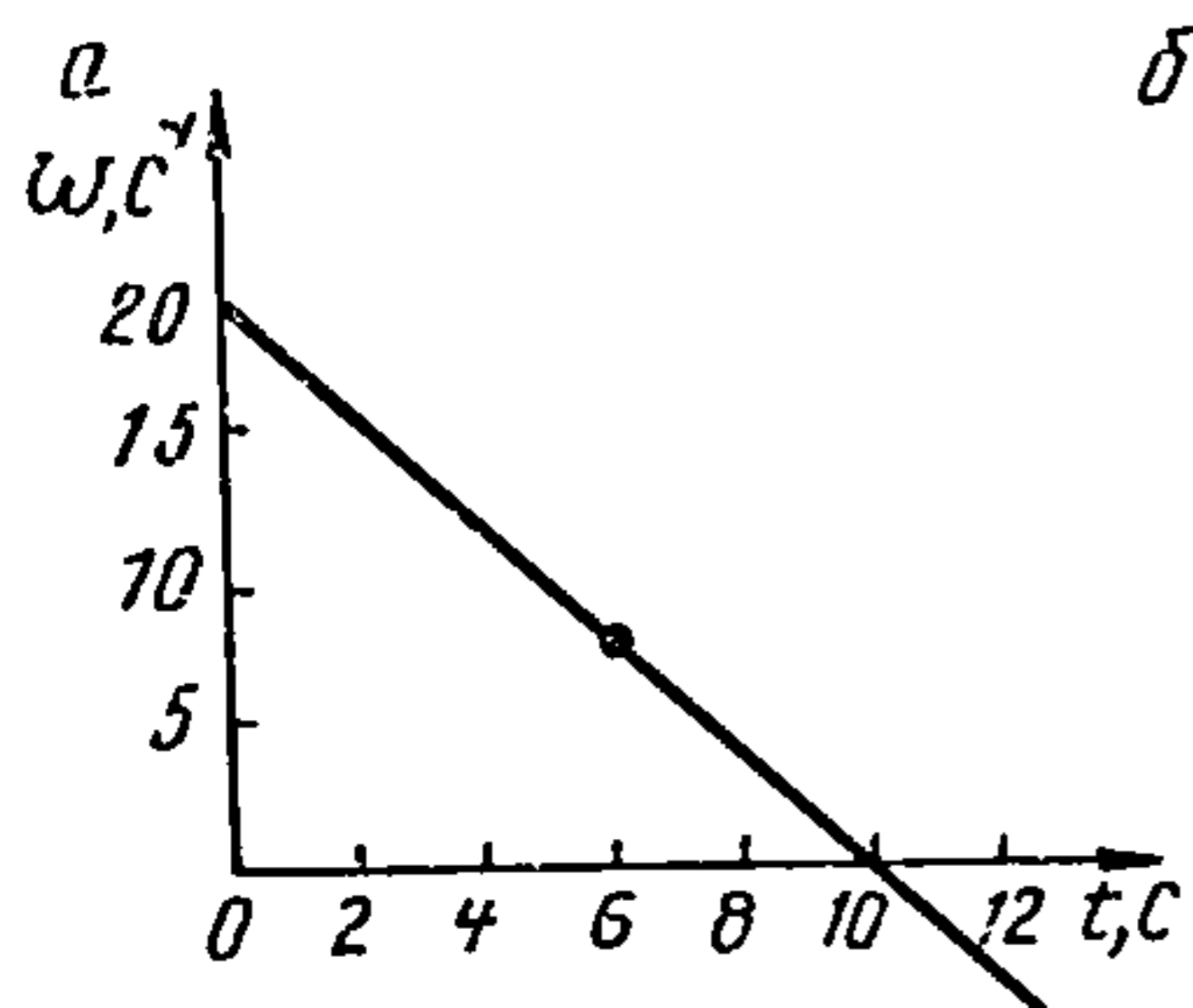
$$t = \frac{v_0 \cos \alpha}{g} (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta) = 1,2 \text{ с.}$$

1.49.  $a_\tau = g^2 t / \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2} = 6,9 \text{ м/с}^2$ ;  $a_n = v_0 g / \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2} = 6,9 \text{ м/с}^2$ ;  $45^\circ$ . 1.50.

Акружнасць  $x^2 + y^2 = 9$ ;  $s = 3\omega t$ . 1.51. Эліпс  $x^2 / 9 + y^2 / 4 = 1$ . 1.52. 295 м/с. 1.53. 800 м/с. 1.54.  $\Delta v = v d / R \approx 1,1 \text{ м/с.}$  1.55. Да моманту падзення дыска на пляцоўку ён будзе рухацца па парабале з гарызантальнай складаючай скорасці, роўнай скорасці каляскі. З моманту падзення на пляцоўку скорасць дыска  $v_x = v_{0x} - \pi n D = -3,2 \text{ м/с}$ , г.зн. дыск будзе рухацца ў працілеглым напрамку таму, у якім ён рухаўся да падзення. 1.56.  $v = \pi n D v_1 / N =$



$= 6,28 n$  м/с, дзе  $n$  — цэлы лік. 1.57.  $n = v_0 t / (2\pi D) = 11$  абаротаў;  $\langle \epsilon \rangle = -2v_0 / (Dt) = -15,9 \text{ с}^{-2}$ . 1.58. 21 м/с; -1 м/с; 14,9 м/с;  $20 \text{ с}^{-1}$ . 1.59.  $\epsilon = \pi (n^2 - n_0^2) / N = 3,8 \text{ с}^{-2}$ . 1.60.  $\langle \omega \rangle = \pi n v / l = 2,7 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ;  $\langle \epsilon \rangle = \pi n v^2 / l^2 = 2,3 \cdot 10^6 \text{ с}^{-2}$ . 1.61.  $\omega_z = 2(10 - t) \text{ с}^{-1}$ ;  $\epsilon_z = -2 \text{ с}^{-2}$ . Цела верціцца роўназапава-

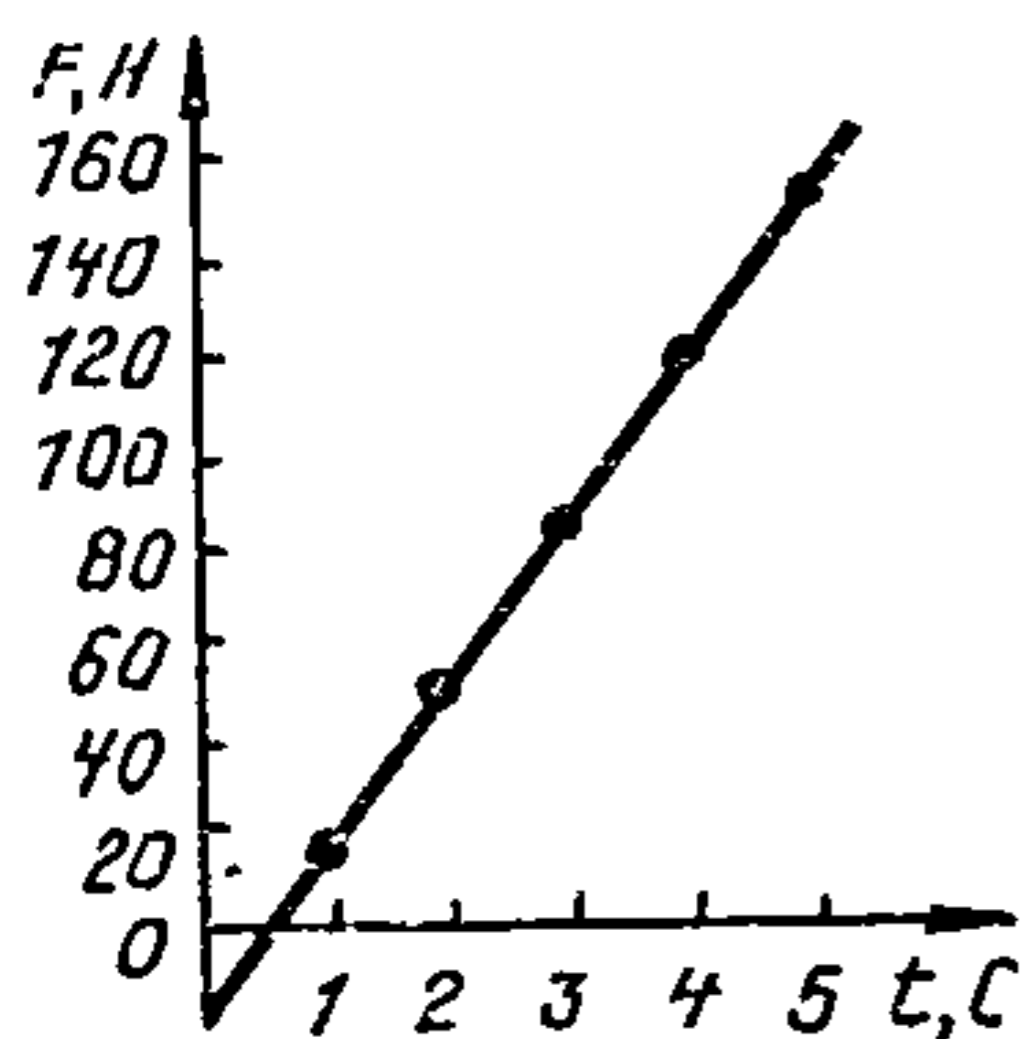


Рыс. 3

лена і ў момант  $t = 10$  с спыняецца, а затым напрамак вярчэння змяняецца на процілеглы. Графікі залежнасці вуглавой скорасці і вуглавога паскарэння цела ад часу прыведзены на рыс. 3, а і б.

1.62.  $v_{\max} = (2\pi/T)A = 7,8 \text{ см/с}$ ;  $a_{\max} = (4\pi^2/T^2)A = 12 \text{ см/с}^2$ . 1.63. 1 с. 1.64.  $x = 0,05 \sin \pi(t + 0,25)$ . 1.65.  $v_{\max} = (2\pi/T)A = 9,4 \text{ см/с}$ ;  $a_{\max} = (4\pi^2/T^2)A = 0,29 \text{ м/с}^2$ ;  $\varphi = -90^\circ$ . 1.66.  $\varphi_0 = 15^\circ$ . 1.67.

$$v_{\max} = \frac{1}{2} \frac{v l}{R} = 2,9 \text{ м/с}; \quad a_{\max} = \frac{1}{2} \frac{v^2 l}{R^2} = 169 \text{ м/с}^2.$$



Рыс. 4

1.68.  $x = 6,8 \sin(2\pi t - 72^\circ 50')$ . 1.69. 0,5 Гц. 1.70.  $x^2 + y^2 = 4$ . Рух адбываецца па крузе супраць стрэлкі гадзінніка. 2.1. 162 Н; гл. рыс. 4. 2.2.  $v = D\sqrt{\pi r l / (2m)} \approx 330 \text{ м/с}$ . 2.3. 1 кН; 0,01; 2 м/с. 2.4. 0,2 м. 2.5.  $s = v_0^2 / [2g(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)] = 7,7 \text{ м}$ ;  $t = v_0 / [g(\mu \cos \alpha + \sin \alpha)] = 1,5 \text{ с}$ . 2.6.  $\mu = (v_0^2 - 2sg \sin \alpha) / (2sg \cos \alpha) = 0,16$ . 2.7. Час спуску большы за час пад'ёму, і канчатковая скорасць пры спуску меншая за пачатковую скорасць пры пад'ёме ў

$$n = \sqrt{\frac{\sin \alpha + \mu \cos \alpha}{\sin \alpha - \mu \cos \alpha}} = 1,2 \text{ раза.}$$

2.8.  $\mu = v_0^2 / (2gs) = 0,64$ . 2.9.  $F = \mu m_2 g / (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) = 10 \text{ Н}$ ;  $a = \mu m_2 g \cos \alpha / (m_1 + m_2) (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) = 0,35 \text{ м/с}^2$ . 2.10.  $s = (m_2 - m_1) g t^2 / [2(m_1 + m_2)] = 0,98 \text{ м}$ . 2.11.  $a = 2F/m - g = 2,2 \text{ м/с}^2$ . 2.12.  $F_l = Fl/L = 100 \text{ Н}$ . 2.13.  $s = 0,5 (g - a) (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) t^2 = 1 \text{ м}$ . 2.14.

$$a = \frac{m_1 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - m_2 g (\sin \beta - \mu \cos \beta)}{m_1 + m_2} = 4,7 \text{ м/с}^2.$$

2.15.  $a = (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)g = 1,3 \text{ м/с}^2$ ;  $s = v_0 t + (\mu \cos \alpha - \sin \alpha)gt^2 / 2 = 160 \text{ м}$ . 2.16.

$s = [F(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu mg]t^2 / 2m = 2,4 \text{ м}$ . 2.17.

$$a = \frac{F}{m} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) - \mu g = 1 \text{ м/с}^2.$$

2.18.  $x = (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)l / (1 + \sin \alpha + \mu \cos \alpha)$ . 2.19. 0,2. 2.20.  $1,5 \text{ м/с}^2$ . 2.21.  $F = 4m_1 m_2 g / (m_1 + m_2) = 26 \text{ Н}$ ;  $F = 4m_1 m_2 (g + a) / (m_1 + m_2) = 34 \text{ Н}$ . 2.22.

$$a = g \frac{m_1 m_2 + m_1 m_3 - 4m_2 m_3}{m_1 m_2 + m_1 m_3 + 4m_2 m_3} = 0,58 \text{ м/с}^2.$$

2.23.

$$a = \frac{m_2 g + \mu m_1 g}{m_1 - \mu m_2} = 6,2 \text{ м/с}^2.$$

2.24.  $a = g \tan \alpha = 5,7 \text{ м/с}^2$ . 2.25.  $F = m \sqrt{a^2 + g^2} = 1,4 \text{ Н}$ ;  $45^\circ$ . 2.26.

$$a = \frac{mg}{2} \frac{\sin 2\alpha}{M + m \sin^2 \alpha} = 2 \text{ м/с}^2.$$

2.27.  $v_0 > \sqrt{2\mu gl(1 + m/M)}$ . 2.28.

$$x = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 \frac{gt^2}{2} = 0,54 \text{ м}.$$

$$a_c = \left( \frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right)^2 g = 1,1 \text{ м/с}^2.$$

2.29.

$$s = \frac{m_1}{m_1 + m_2} l = 1 \text{ м}.$$

2.30.

$$l = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} h = 5 \text{ см}.$$

2.31.

$$h = \frac{ut}{2} \ln \frac{M}{M - Qt} - \frac{gt^2}{2} = 65 \text{ км}.$$



2.32.

$$Q = \frac{Mg}{u} e^{-gt/u}.$$

2.33.

$$v = \frac{F}{Q} \ln \frac{M}{M - Qt} = 6,2 \text{ м/с.}$$

2.34.  $\mu = 4\pi^2 n^2 R/g = 0,1$ . 2.35.  $v = \sqrt{\mu Rg} = 24 \text{ м/с}$ . 2.36.  $v = \sqrt{gR/3} = 10 \text{ м/с}$ .

2.37.  $T = 2\pi\sqrt{l\cos\alpha/g} = 1 \text{ с}$ . 2.38.  $h = l(1 - F/(3mg)) = 0,26 \text{ м}$ . 2.39. 2 с. 2.40.

$$x_{\min} = \frac{g(\cos\alpha - \mu\sin\alpha)}{\omega^2 \sin\alpha(\sin\alpha - \mu\cos\alpha)} = 0,19 \text{ м};$$

$$x_{\max} = \frac{g(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)}{\omega^2 \sin\alpha(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)} = 0,42 \text{ м}.$$

3.1.  $A = sm [g(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) + 2s/t^2] = 170 \text{ Дж}$ . 3.2.

$$A = \frac{mv}{2} (gt - v) = 168 \text{ Дж}.$$

3.3.  $N = mgv(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) = 26 \text{ кВт}$ . 3.4.  $A = mgt(gt/2 - v_0\sin\alpha) = 1 \text{ кДж}$ ,  $N = mg(gt - v_0\sin\alpha) = 440 \text{ Вт}$ . 3.5.  $A = sm(a + g\sin\alpha + \mu g\cos\alpha) = 44 \text{ МДж}$ . 3.6.

$$N = \frac{mh}{\eta t} \left( g + \frac{2h}{t^2} \right) = 4,1 \cdot 10^5 \text{ Вт}.$$

3.7.  $A = smg(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) = 4,4 \cdot 10^9 \text{ Дж}$ ;  $N = mg(\sin\alpha + \mu\cos\alpha)v = 3,3 \cdot 10^7 \text{ Вт}$ .

3.8.

$$N = \frac{nmv}{2} \left( kg + \frac{v}{t} \right) = 350 \text{ кВт}.$$

3.9.

$$A = \frac{mga}{2} (\sqrt{2} - 1) = 2 \text{ Дж}.$$

3.10. 12,7 кДж. 3.11.  $v_1/v_2 = \sqrt{2\mu\sin 2\alpha} = 0,2$ . 3.12.  $A = Fh/\sin\alpha = 100 \text{ Дж}$ . Адна частка роботи пойдзе на награванне цела і нахільнай плоскасці ( $A_{\text{тр}} = \mu mghtg\alpha = 6,8 \text{ Дж}$ ), другая частка — на павелічэнне патэнцыяльнай ( $E_p = mgh = 19,6 \text{ Дж}$ ) і кінетычнай ( $E_k = A - E_p - A_{\text{тр}} = 73,6 \text{ Дж}$ ) энергіі цела. 3.13.

$$\cos\alpha = 1 - \frac{m^2 v^2}{M^2 2gl} = 0,898; \alpha \approx 26^\circ.$$

3.14.  $N = \rho ghQ = 2,9$  ГВт, дзе  $\rho$  — шчыльнасць вады. 3.15.  $E_k = mgh(1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha) = 23$  Дж. 3.16.  $1 - m / (M + m)$ . 3.17. 1)  $v_1 = (m_2 - m_1) \sqrt{2gl} / (m_1 + m_2) = 3,8$  м/с;  $v_2 = 2m_1 \sqrt{gl} / (m_1 + m_2) = 2,5$  м/с. 2)  $v = m_1 \sqrt{2gl} / (m_1 + m_2) = 1,3$  м/с;  $\eta = m_2 / (m_1 + m_2) = 0,8$ . 3.18.  $\Delta E = m_1 m_2 (v_1 + v_2)^2 / [2(m_1 + m_2)] = 120$  Дж. 3.19.  $m_1 = m_2 / 3 = 0,2$  кг. 3.20.  $v = m \sqrt{2gh} / [M(M - m)]$ . 3.21.  $M = m [1 + v^2 / (2gS)] = 19,2$  кг. 3.22.  $N = mg^2 t = 96$  Вт. 3.23. 1)  $v_0 = \sqrt{gR(3 \sin \alpha - 2)} = 2,4$  м/с. 2)  $v_0 = \sqrt{gR[(3 + \pi \mu (90^\circ - \varphi) / 180^\circ) \sin \varphi - 2]} = 2,5$  м/с. 3.24.  $Q = 4/3 \pi r^3 \rho gh - mg(h + h_1) = 22$  мДж. 3.25.  $l = mv^2 / 2 [F \cos \beta + \mu \sin \beta] - mg(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) = 0,32$  м. 3.26. Час падзення. 3.27. Скорасць шара ў момант удару аб зямлю будзе большая ў тым выпадку, калі яго пачатковая скорасць была накіравана вертыкальна ўверх. Аднолькавыя скорасці маглі б быць толькі пры адсутнасці трэння аб паветра. 3.28. Залежыць, таму што пры змяненні скорасці пад'ёму будзе выконвацца работа не толькі на павелічэнне патэнцыяльнай энергіі, але і на наданне цэлу паскарэння. 3.29.  $A = 0,5 \mu mgl \alpha$ . 3.30.  $-1,4$  м/с. 3.31.

$$\Delta t = \frac{2mv}{F} \sin \frac{\alpha}{2} = 0,045 \text{ с.}$$

3.32.  $a = (\rho sv^2 - rmg) / m = 0,15$  м/с<sup>2</sup>, дзе  $\rho$  — шчыльнасць вады. 3.33.  $v_0 = \sqrt{\mu g(2s + \mu gt^2)} = 3,7$  м/с. 3.34.  $v = m_1 v_1 / (m_1 + m_2) = 1,6$  м/с. 3.35. 44 м/с. 3.36.  $v_0 = M \sqrt{2\mu gs} / (m \cos \alpha) = 970$  м/с. 3.37.

$$s = \frac{(2v_0 \cos \alpha - v_1) s_1 + 3v_1 v_2 \cos \alpha t}{2(v_0 \cos \alpha + v_1)} = 19 \text{ м.}$$

3.38.  $v_2 = [Mv + m(v + u)] / (M + m) = 5,1$  м/с;  $v_2 = v = 5$  м/с;  $v_3 = [Mv + m(v - u)] / (M + m) = 4,9$  м/с. 3.39.

$$v_1 = -v_2 = \frac{M}{M + 2m} v = 3,3 \text{ м/с.}$$

$$v'_1 = -v'_2 = \frac{M - m}{M + m} v = 3 \text{ м/с.}$$

3.40.  $F = m \sqrt{2gH} / \Delta t = 20$  кН. 3.41.  $\vec{M} = -10\vec{i} + 11\vec{j} + 2\vec{k}$  (Н·м);  $M = 15$  Н·м;  $M_z = 2$  Н·м. 3.42.  $L = mv_0^3 \sin^2 \alpha \cos \alpha / (2g) = 14$  кг·м<sup>2</sup>/с. 3.45.  $v_c = 0,33$  м/с;  $\omega = 0,3$  рад/с. 3.48.  $L = 0,5mgv_0 \cos \alpha t^2$ . 3.49.  $\Delta \vec{L} = -15$  кг·м<sup>2</sup>/с. 4.1.  $I = (7/5)mR^2 = 0,07$  кг·м<sup>2</sup>. 4.2.  $6 \cdot 10^{-2}$  кг·м<sup>2</sup>. 4.3.  $9,8 \cdot 10^{37}$  кг·м<sup>2</sup>. 4.4.  $I = mR^2 (g - a) / a = 4,4 \cdot 10^{-2}$  кг·м<sup>2</sup>. 4.5.  $M = \pi n m R^2 / t = 0,38$  Нм. 4.6.  $a = (m_2 - m_1)g / (m_1 + m_2 +$



$$+ m/2) = 1,8 \text{ м/с}^2; \epsilon = (m_2 - m_1)g / (m_1 + m_2 + m/2)R = 18\text{с}^{-2}. 4.7.$$

$$v = \frac{2R}{r} \sqrt{\frac{hmg}{m_1 + 2m}} = 21 \text{ м/с}.$$

4.8.

$$t = \frac{\pi n}{m_3 g r} [r^2(m_2 + 2m_3) + 2m_1 R^2] = 21 \text{ с}.$$

$$4.9. s = m_2 g (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) t^2 / (2m_2 + m_1) = 2,6 \text{ м}. 4.10. s = 3v_0^2 / (4g \sin \alpha) = 7,5 \text{ м}.$$

$$4.11. v = (7/5) g t \sin \alpha = 5,2 \text{ м/с}. 4.12. N = mR^2 \omega^2 / (4t) = 4 \text{ кВт}. 4.13. E_k = (3/4) m v^2 = 6 \text{ Дж}. 4.14. 16 \text{ кДж}. 4.15. M = 2\pi n m R^2 / t = 28 \text{ Нм}; A = 2\pi^2 n^2 m R^2 = 36 \text{ кДж}; 4.16.$$

$$N = \frac{2\pi^2 n^2 R^2}{t} \left( \frac{m_1}{2} + m_2 \right) = 190 \text{ Вт}.$$

$$4.17. \Delta E = 2\pi^2 n^2 R^2 m_1 m_2 / (m_1 + m_2) = 16 \text{ Дж}. 4.18. \text{Пры слізганні без трэння скорасць большая ў } 1,4 \text{ раза}. 4.19. s = 1,4h / \sin^3 \alpha = 1,4 \text{ м}. 4.20. n = 3Fl / (4\pi M g \mu R). 4.21. \omega = (\rho_1 \omega_1 + \rho_2 \omega_2) / (\rho_1 + \rho_2) = 8,8 \text{ с}^{-1}. 4.22. 49 \text{ Н}; 98 \text{ Н}. 4.23. F = 2mg \cos(\alpha/2) = 85 \text{ Н}. 4.24.$$

$$m_1 = \frac{m_2 (\cos \alpha_2 - \mu \sin \alpha_2) + \mu m}{\cos \alpha_1 + \mu \sin \alpha_1} = 7,6 \text{ кг}.$$

$$4.25. l = 2a \sqrt{1 - m^2 g^2 / (4F^2)} = 0,94 \text{ м}. 4.26. 21 \text{ Н}. 4.27. h = 2R / \text{tg} \alpha = 0,3 \text{ м}. 4.28. F_A = 3,7 \text{ кН}; F_B = 2,2 \text{ кН}. 4.29. F = F_T \text{tg} \alpha = 11 \text{ Н}. 4.30. \mu = 1. 4.31. \text{tg} \varphi = 2\mu; \varphi = 31^\circ. 4.32. 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг}. 4.33. x_0 = 0,12 \text{ м}; y_0 = 0,058 \text{ м}. 4.34. \text{Цэнтр мас зрушаны ў бок свінцовай часткі на адлегласць } 4,4 \text{ см ад геаметрычнага цэнтра стрыжня}. 4.35. \text{Цэнтр мас зрушаны на } 0,01 \text{ м ад цэнтра дыска}. 4.36. h < 2R. 5.1. h = 2mv^2 / (\pi \rho l g d^2) = 31 \text{ м}. 5.2. F = V[(\rho_T - \rho_{ж})g + \rho_T a] = 31 \text{ кН}. 5.3. \eta = mgs_1 h_1 n / (s_2 N t) = 0,54 (54 \%). 5.4. \text{Медны}; v = (\rho_M - \rho_a) / (\rho_M \rho_a) = 10^{-3} \text{ м}^3. 5.5. V_\eta = (\rho_{рт} - \rho_{ст}) / (\rho_{рт} - \rho_{в}) V \approx 0,47 V. 5.6.$$

$$m = \frac{m_1 [(1 - n)\rho_2 - \rho_1] \rho_3}{(\rho_3 - \rho_2) \rho_1} = 2,7 \text{ кг},$$

дзе  $\rho_2$  — шчыльнасць вады;  $\rho_3$  — шчыльнасць корка. 5.7.  $p = \rho h(g + a) = 2 \text{ кПа}$ . 5.8.  $m = \rho_2 V(\rho_1 - 2\rho) / [2(\rho_2 - \rho_1)] = 17 \text{ кг}$ ;  $T = (V_g / 2)(\rho_1 - 2\rho_2) = 150 \text{ Н}$ , дзе  $\rho, \rho_1, \rho_2$  — шчыльнасць корка, вады і жалеза адпаведна. 5.9.

$$T = \rho g l \frac{s_1 s_2}{s_1 - s_2}.$$

5.10.  $F_1/F_2 = (2gh + v_l)^2 / (2gh - v_l)^2 = 3,5$  раз. 5.11. 0,5 м. 5.12.  $v_1 = \sqrt{2gh + al} = 4,6$  м/с;  $v_2 = \sqrt{2gh - al} = 4,2$  м/с. 5.13.

$$Q = \frac{sl}{2h} \sqrt{2gh} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

5.14.

$$v_{\max} = \sqrt{2(g + \frac{4\pi^2}{T^2} A)h} = 1,5 \text{ м/с}.$$

$$v_{\min} = \sqrt{2(g - \frac{4\pi^2}{T^2} A)h} = 1,3 \text{ м/с}.$$

5.15.  $F = \sqrt{2Q^2 / (\rho S)} = 14$  Н. 5.16.  $F = \pi r^2 \rho v^2 / 2 = 63$  Н. 5.17.  $F = C_x \rho S v / 2 = 3,7$  кН. 5.18.

$$N = [\mu mg + \frac{\rho(v_1 + v_2)^2 S}{2}] v_2 = 2,2 \text{ кВт}.$$

5.19.  $N = \rho S v^3 / 2 = 140$  кВт. 5.20. 0,9 м. 5.21.  $v = \sqrt{2\Delta p / [(\dot{n}^4 - 1)\rho]} = 0,5$  м/с. 5.22.

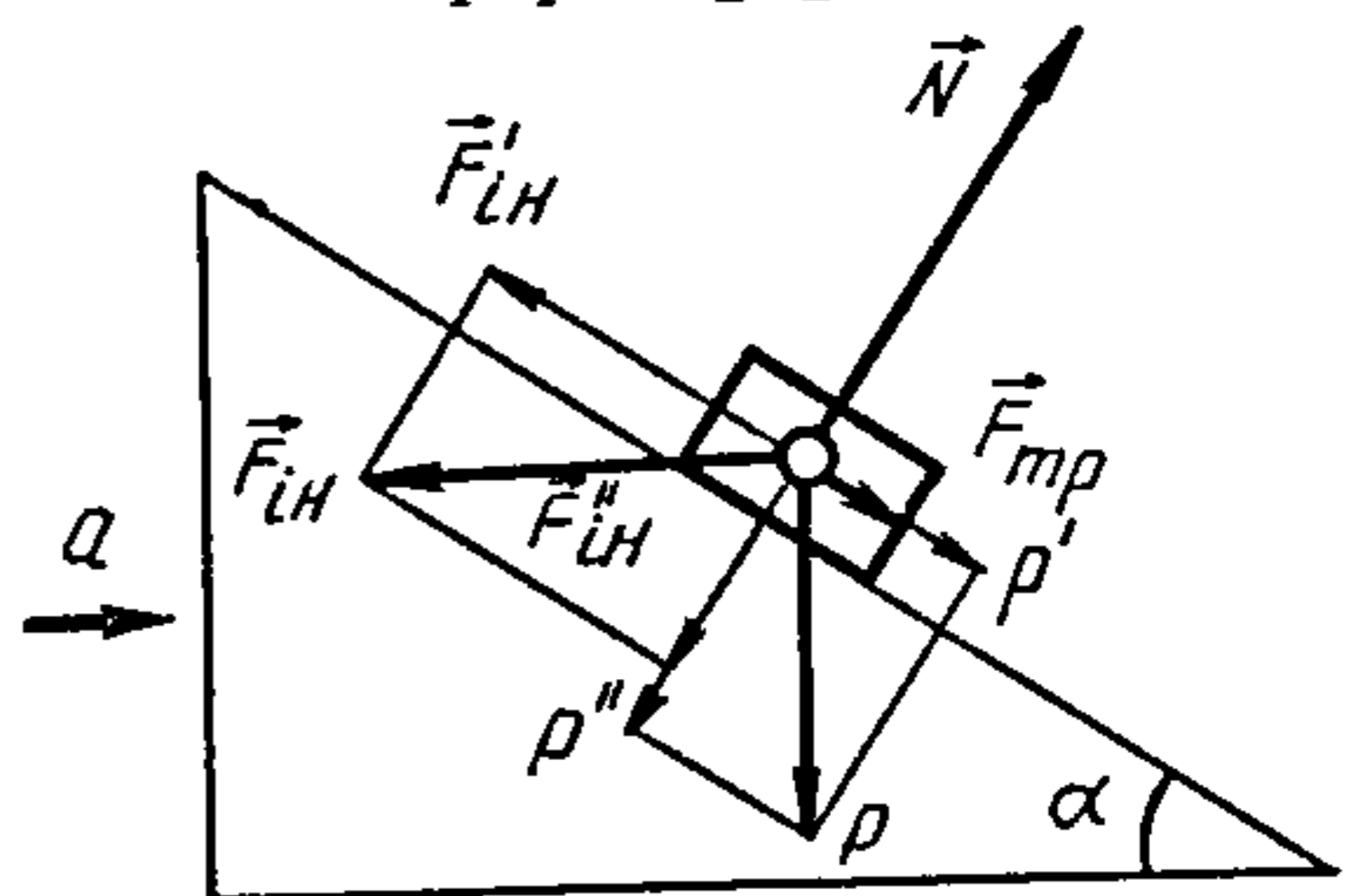
$$N = \frac{n}{t} \frac{p m}{\rho} = 2,2 \text{ Вт}.$$

5.23. 60 кДж. 5.24.  $\eta = 2r^2 g (\rho_{\text{ст}} - \rho_{\text{гл}}) / (9v) = 1,6 \cdot 10^{-2}$  кг/(м·с). 5.25.  $r = \sqrt[4]{8t\eta v / (\pi \rho g h t)} = 1,4$  см. 5.26. 4,9 Н. 5.27. 0,15 м/с; 3,3 м/с. 5.28.

$$r = \sqrt[3]{\frac{9\eta^2 R_e}{4g\rho_{\text{гл}}(\rho_{\text{ст}} - \rho_{\text{гл}})}} = 1,4 \text{ мм}.$$

5.29.  $F \approx \rho G S M_3 / (R_3 + h) = 470$  мН, дзе  $M_3, R_3$  — маса і радыус Зямлі адпаведна;  $G$  — гравітацыйная пастаянная. 5.30.  $\rho = (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) / (h_1 + h_2)$ .

6.1.  $v = \sqrt{2g \text{tg} \alpha} = 20$  м/с. 6.2.  $a = g \text{tg} \alpha = 5,7$  м/с<sup>2</sup>. 6.3. У сістэме адліку, звязанай з нахільнай плоскасцю, да цела прыкладзены 4 сілы (рыс. 5): сіла цяжару  $P = mg$ , сіла інерцыі  $F_{\text{ін}} = ma$ , рэакцыя апоры нахільнай плоскасці  $N$  і сіла трэння  $F_{\text{тр}} = \mu(F_{\text{ін}}' + p'')$ , дзе  $m$  — маса цела;  $a$  — паскарэнне нахільнай плоскасці. Найменшае паскарэнне



Рыс. 5



знойдем з умовы, што сума праекцый гэтых сіл на напрамак, паралельны нахільнай плоскасці, роўная нулю, г.зн.  $F_{ін} = F_{тр} + p'$ . Улічваючы, што  $F_{ін} = mg \cos \alpha$ ,  $p' = mg \sin \alpha$  і  $F_{тр} = \mu(mg \sin \alpha + mg \cos \alpha)$ , маем:  $a = (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)g / (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)$ . 6.4.

$$1) \mu = \frac{g \sin \alpha - a \cos \alpha}{g \cos \alpha + a \sin \alpha} = 0,07;$$

$$2) \mu = \frac{a \cos \alpha + g \sin \alpha}{g \cos \alpha - a \sin \alpha} = 0,3.$$

6.5.

$$s = \frac{a}{2} (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) t^2 = 0,57 \text{ м/с}^2.$$

$$6.6. \mu = \omega^2 R / g = 0,2. \quad 6.7. 69^\circ 50'. \quad 6.8. v = \sqrt{(R - l)g / \mu} = 15 \text{ м/с}. \quad 6.9.$$

$$v' = \frac{\omega}{2} \sqrt{l_1^2 - l_2^2} = 0,49 \text{ м/с}.$$

6.11.  $v = \omega R^2 / s = 20 \text{ м/с}$ . 6.12.  $F = 380 \text{ Н}$ . 6.13.  $\Delta F = 4m\omega\omega_0$ , дзе  $\omega_0$  -- вуглавая скорасць вярчэння Зямлі. 6.14.

$$s = \frac{2}{3} \omega_0 h \sqrt{(2h/g) \cos \alpha} = 3 \text{ см}.$$

6.15.

$$s = \frac{4}{3} \omega \frac{v_0^3}{g_2} \cos \varphi = 4 \text{ м}.$$

6.16.  $2^\circ 10'$ . 7.1. Адваротныя пераўтварэнні Лорэнца можна атрымаць згодна з прынцыпам адноснасці або рашыць сістэму ўраўненняў пераўтварэння Лорэнца адносна нештрахаваных велічынь:

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{(1 - v^2)/c^2}}.$$

$$7.2. l_1 = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2} \text{ і } l_0 = l_2 \sqrt{1 - v^2/c^2}, \text{ адсюль } l_0 = \sqrt{l_1 l_2} = 4,24 \text{ м}; \quad v = c \sqrt{1 - l_1/l_2} =$$

$$= 212 \text{ Мм/с}. \quad 7.3. \Delta D = D_0 (1 - \sqrt{(1 - v^2)/c^2}) \approx 12,7 \text{ см}, \text{ дзе } D_0 \text{ -- сярэдні дыя-$$

метр Зямлі. 7.4. У самалёце час ідзе павольней на 5 дзесяцімільярдных долей працэнта. Гэта адпавядае адставанню гадзінніка прыблізна на 1 с за 10 000 гадоў. 7.5. На 69,4 года. 7.7. Няхай  $u_y' = u_z' = 0$ ;  $u_x' = c$ . Тады  $u_x = c$ ;

$$u_y = 0, \quad u_z = 0. \quad 7.8.$$

$$u_x = \frac{c + v}{1 + cv/c^2} = c.$$

7.9. Скорасці  $u'_x$ ;  $v$  і  $u_x$  аднолькава накіраваны ўздоўж адной прамой. Тады

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + u'_x v / c^2} \approx 2,93 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

7.10. 0,5 с. 7.11.  $(ct_{12})^2 - (\Delta x)^2 = (ct'_{12})^2 - (\Delta x')^2$ ;  $\Delta x' = 0$ ;  $t_{12} = \sqrt{(t'_{12})^2 + (\Delta x/c)^2} \approx \sqrt{25+400} = 20,6$  года;  $30+20,6 = 50,6$  года. 7.12. У 22,4 раза. 7.13. У 1,2 раза. 7.14. 299,97 Мм/с. 7.15. У 1,8 раза. 7.16.  $E_k^{\text{кл}} = 114$  кэВ;  $E_k^{\text{рэл}} = 175$  кэВ. 7.17. 0,15;  $1,58 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с. 7.18. 298 Мм/с. 7.19.  $1,11 \cdot 10^{-17}$  кг. 7.20. Пры малых скорасцях руху  $(v/c) \ll 1$ . Тады

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{c^2} \quad \text{і}$$

$$E_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{(1 - v^2)/c^2}} - 1 \right) = \frac{mv^2}{2}.$$

8.1. 0,04. 8.2.  $F = ESd(t - t_0) = 2,5$  кН. 8.3.

$$d = d_0 \left( 1 - \mu \frac{\Delta l}{l} \right) = 5 \text{ мм.}$$

8.4.

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{4F(1 - 2\mu)}{\pi E d^2} = 0,001.$$

8.5.  $l = p_m / (\rho g) = 9$  км. 8.6. 0,5. 8.7.  $a = (p_m \oslash gl) \rho l$ . 8.8.  $\varepsilon_l = \rho l(g + a) / E$ . 8.9.

$$\mu = \frac{\psi}{2\varepsilon_l} - 1 = 0,35.$$

8.10.  $d = 2^4 \sqrt{2Ml/(\pi G\varphi)} = 3$  мкм. 8.11.  $\varepsilon_l = \sqrt{2A/(ESD)} = 0,001$ . 8.12.  $\omega = E\varepsilon_l^2/2 = 100$  кДж/м<sup>3</sup>. 8.13.  $x = v\sqrt{mx_0/(2F)} = 0,1$  м. 8.14.  $F = mg(1 + \sqrt{2h/x_0 + 1}) = 6,5$  кН. 8.15.  $F = mgs/x = 88$  Н. 8.16.  $h = ES\Delta l^2/(2mgl) = 36$  м. 8.17. 1,8. 8.18.

$$x = \frac{m}{k} [g + \sqrt{a(2g - a)}].$$

9.1.  $E_p = 15$  мкДж;  $E_k = 47$  мкДж;  $E = 62$  мкДж. 9.2. 9,8 г; 0,02 с. 9.3.  $A = E/F = 0,02$  м. 9.4. У  $10^8$  разоў. 9.5.

$$\beta = \frac{1}{2} \ln \frac{A_0}{A} = 0,3 \text{ с}^{-1}.$$

9.7. Запаволіцца ў 1,003 раза. 9.8.  $n = T_1/T_2 = \sqrt[4]{1 + (a/g)^2}$ . 9.9.  $k =$



$$= 4\pi^2 m \nu^2 = 200 \text{ Н/м. 9.10. } T = 2\pi\sqrt{\Delta x/g} = 0,28 \text{ с. 9.11.}$$

$$x = \sqrt{g \frac{(\mu \cos \alpha - \sin \alpha)}{\Lambda}} = 0,7 \text{ Гц.}$$

9.12.

$$\nu = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{2h}} \frac{\sin \beta \sin(\alpha - \beta)}{\sin \beta + \sin(\alpha - \beta)} = 0,23 \text{ с}^{-1}.$$

$$9.13. T = 2\pi\sqrt{(m_1 + m_2)/(Sg\rho)} = 0,9 \text{ с. 9.14. } \nu = \sqrt{4km - r^2}/(4\pi m) = 2,5 \text{ Гц. 9.15.}$$

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3g(l - 2d)}{2(l^2 - 3ld + 3d^2)}} = 0,92 \text{ Гц.}$$

$$9.16. T = 2\pi\sqrt{[m + 3(m_1 + m_2)]l/6g(m_2 - m_1)} = 3 \text{ с. 9.17. } T = 2\pi\sqrt{2l/[3(g + a)]} = 1,1 \text{ с. 9.18. } \nu = (1/2\pi)\sqrt{2g/(3R)} = 1,3 \text{ Гц. 9.19. } T = 2\pi\sqrt{ml/(4Mg)} = 0,16 \text{ с. 9.20.}$$

$$T = 4\pi \frac{R^2}{r^2} \sqrt{\frac{\rho l R}{15G}} = 3,2 \text{ с.}$$

$$9.21. 0,03 \text{ м. 9.22. } T = 2\pi\sqrt{\rho h/(\delta g)} = 180 \text{ с. 9.23. } T = 2\pi\sqrt{m_1 m_2 / [(m_1 + m_2)k]}.$$

9.24. Цела дасягне пункта *B* хутчэй у тым выпадку, калі будзе слізгаць па паверхні сферы. 9.25. Па чарзе падвесіць грузы на спружыне, вызначыць перыяды іх ваганняў і вызначыць невядомую масу па формуле  $m_1 = m_2 T_1^2 / T_2^2$ .

$$9.26. 340 \text{ м/с; } 0,4 \text{ м/с. 9.27. } 0,11 \text{ м. 9.28. } 1,5 \text{ м/с. 9.29. У } 1,5 \text{ раза. 9.30. } 1600 \text{ м/с. 9.31. } 1160 \text{ м/с. 9.32. } 1400 \text{ м/с. 9.33. } k = 4\rho h^2/l^2 = 2,1 \text{ ГПа. 9.34. } F = \pi r l^2 d^2 \nu^2 = 45 \text{ Н. 9.35.}$$

$$\nu = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{F}{\pi\rho}} = 129 \text{ м/с.}$$

$$9.36. \nu = \sqrt{Fl/m} = 200 \text{ м/с. 9.37.}$$

$$\Delta\nu = \nu - \frac{1}{ld} \sqrt{F/(\pi\rho)} = 1,3 \text{ Гц.}$$

$$9.38. 5700 \text{ м/с. 9.39. } \nu = \nu/2l = 170 \text{ Гц. 9.40. } \nu = \nu/4l = 250 \text{ Гц. 9.41. } 10^8; 1 \text{ Вт/м}^2; 10 \text{ нВт/м}^2. 9.42. 140 \text{ дБ. 9.43. } \Delta x = 2\nu\nu/(c - \nu) = 0,42 \text{ кГц. 9.44. } \nu' = [(c + \nu_1)/(c - \nu_2)]^2 \nu = 51 \text{ кГц. 9.45. } \nu_1' = [\nu(c + \nu_2)]/(c - \nu_1) = 566 \text{ Гц; } \nu_2' = [\nu(c - \nu_2)]/(c + \nu_1) = 445 \text{ Гц; } \nu_3' = [\nu(c + \nu_1)]/(c - \nu_2) = 562 \text{ Гц; } \nu_4' = [\nu(c - \nu_1)]/(c + \nu_2) = 442 \text{ Гц. 9.46. } u = [\nu(\tau_0 - \tau)]/(\tau_0 + \tau). 10.1. 570 \text{ км. 10.2. } h = \sqrt[3]{gR_3^2 T^2/(4\pi^2)} - R_3 = 13,4 \text{ Мм. 10.3. } \nu = \sqrt{2GM_\pi/R_\pi} = 2,4 \text{ км/с. 10.4.}$$

$10^3$  м/с. 10.5.  $x = 54R_3 = 344$  Мм. 10.6.  $v = \sqrt{GM_C/r} = 29,8$  км/с. 10.7.  $\rho = 3g/(4\pi GR_3) = 5500$  кг/м<sup>3</sup>. 10.8.  $M_3 = 4\pi^2 (R_3+h)^3 GT^2 = 6 \cdot 10^{24}$  кг. 10.9.  $v = \sqrt{2gM_3/R_3} = 1,02$  км/с. 10.10.  $v = \sqrt{2GM_3/R_3} = 11,2$  км/с. Указание: ска-рыстаць закон захавання энергіі. 10.11. На 0,002 яе масы на ўзроўні мора. 10.12.  $h = 0,41R_3 = 2,6$  Мм. 10.13.  $60$  мкм/с<sup>2</sup>. 10.14.  $197$  Гм. 10.15.  $v = 2v_{cp}r^2/(r_1+r_2) = 30,3$  км/с. 10.16.  $A = mgr_3 = 310$  ГДж. 10.17. Не. Пры запуску спадарожніка на арбіту большага радыуса яго кінетычная энергія зменшыцца, але павялічыцца патэнцыяльная энергія, і сумарная работа, якая патрэбна для запуску спадарожніка, павялічыцца. 10.18.  $\rho = (2/3)\pi G\rho^2 R^2$ .

### МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА І ТЭРМАДЫНАМІКА

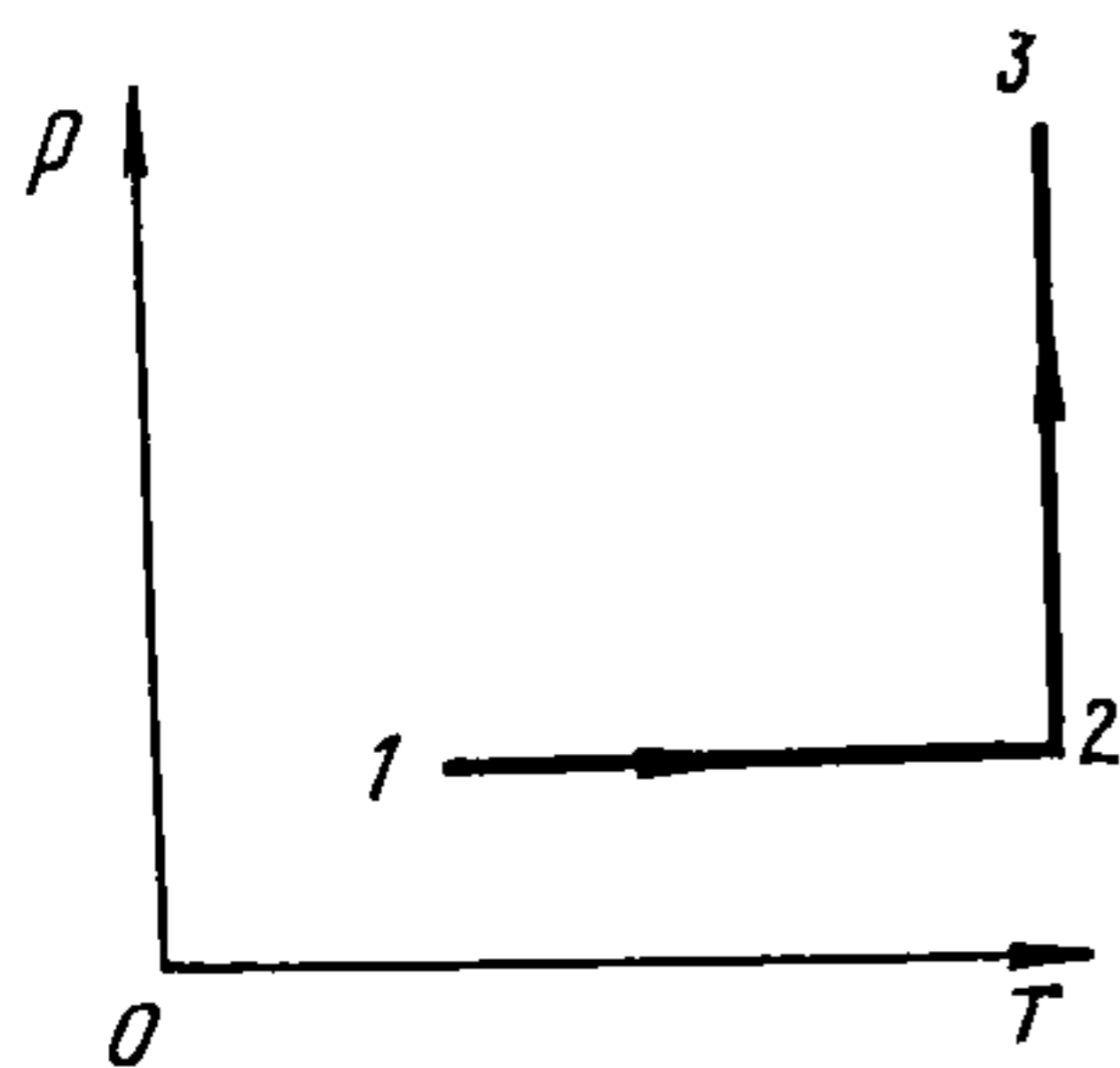
11.1.  $5 \cdot 10^{12}$  атамаў. 11.2. На  $1,9 \cdot 10^{19}$  малекул. 11.3.  $2,3 \cdot 10^{22}$  часцінак. 11.4.  $3,3 \cdot 10^{19}$  атамаў. 11.5.  $l = \sqrt[3]{Wkt/\rho} = 0,33$  мкм. 11.6.  $\Delta n = -1,22 \cdot 10^{25}$  малекул/м<sup>3</sup>. 11.7.  $\Delta p = -4$  кПа. 11.8.  $9,8$  кПа. 11.9.

$$N_1 = N \frac{1}{1 + \frac{l}{\tau} \sqrt{M/(3RT)}} = 0,98 N.$$

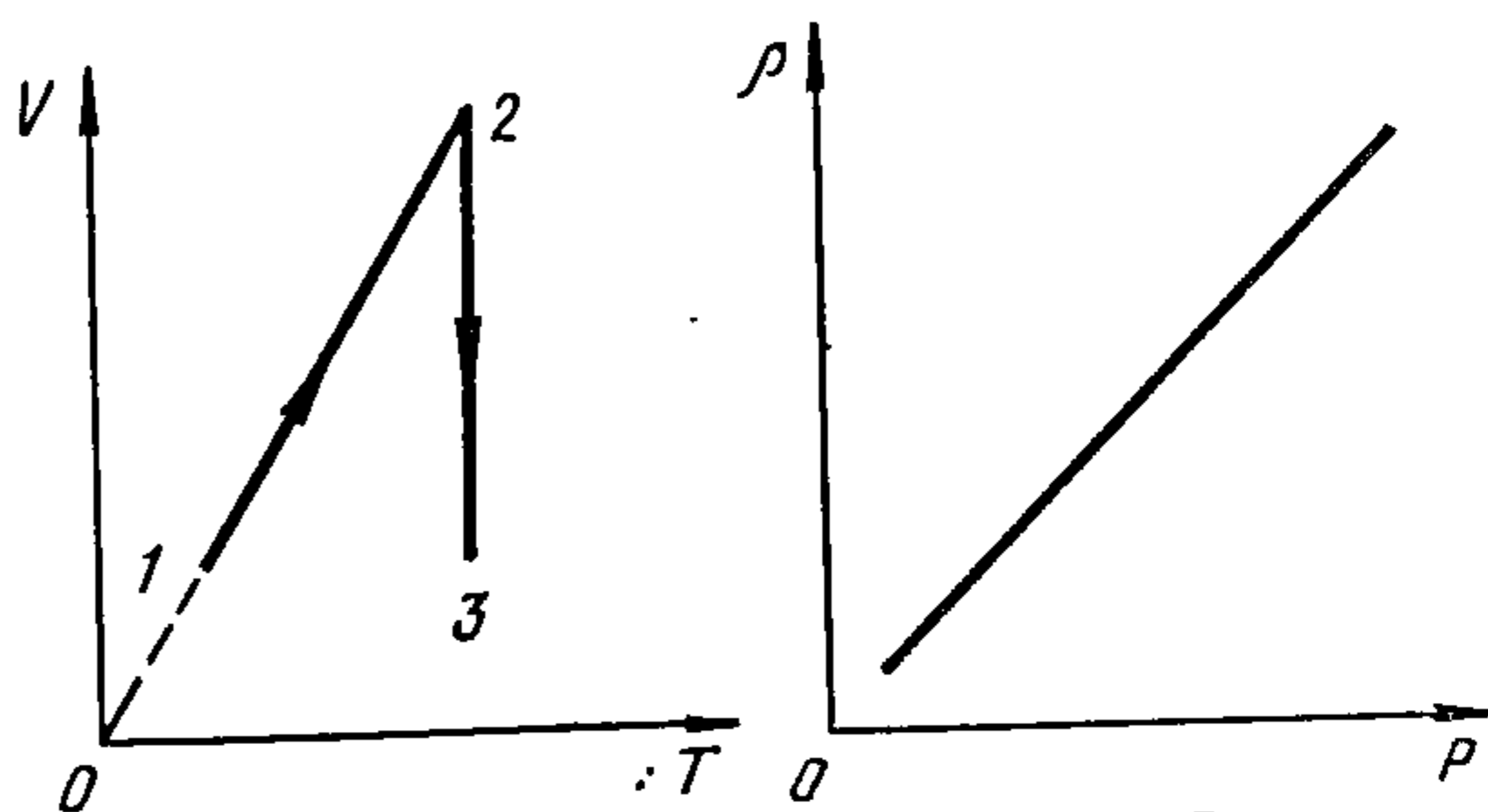
11.10.  $\tau = 6\Delta p v / (\rho S) \sqrt{M/(3RT)} = 2$  мін. 11.11. Калі  $n_{O_2} = n_{He}$ , то  $N_{O_2}/N_{He} = \sqrt{M_{He}/M_{O_2}} = 1/2\sqrt{2}$ , а калі  $m_{O_2} = m_{He}$ , то

$$\frac{N_{O_2}}{N_{He}} = \sqrt{\frac{M_{He}}{M_{O_2}}} \quad \frac{M_{He}}{M_{O_2}} = \frac{1}{16\sqrt{2}}.$$

11.12.  $2,4$  МДж. 11.13.  $1,5$  кДж;  $0,5$ ;  $0,4$ . 11.14.  $1,5$  кДж. 11.15.  $8,2$  кДж. 11.16.  $\langle \epsilon \rangle = 3(N-1)kT = 1,24 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $\langle \epsilon_n \rangle / \langle \epsilon \rangle = 1/[2(N-1)] = 1/6$ , дзе  $N$ — лік атамаў у малекуле. 11.17.  $T_{max} = T + Mv^2/(5R) = 335$  К. 11.18. Гл. рыс. 6. 11.19. Гл. рыс. 7.



Рыс. 6



Рыс. 7



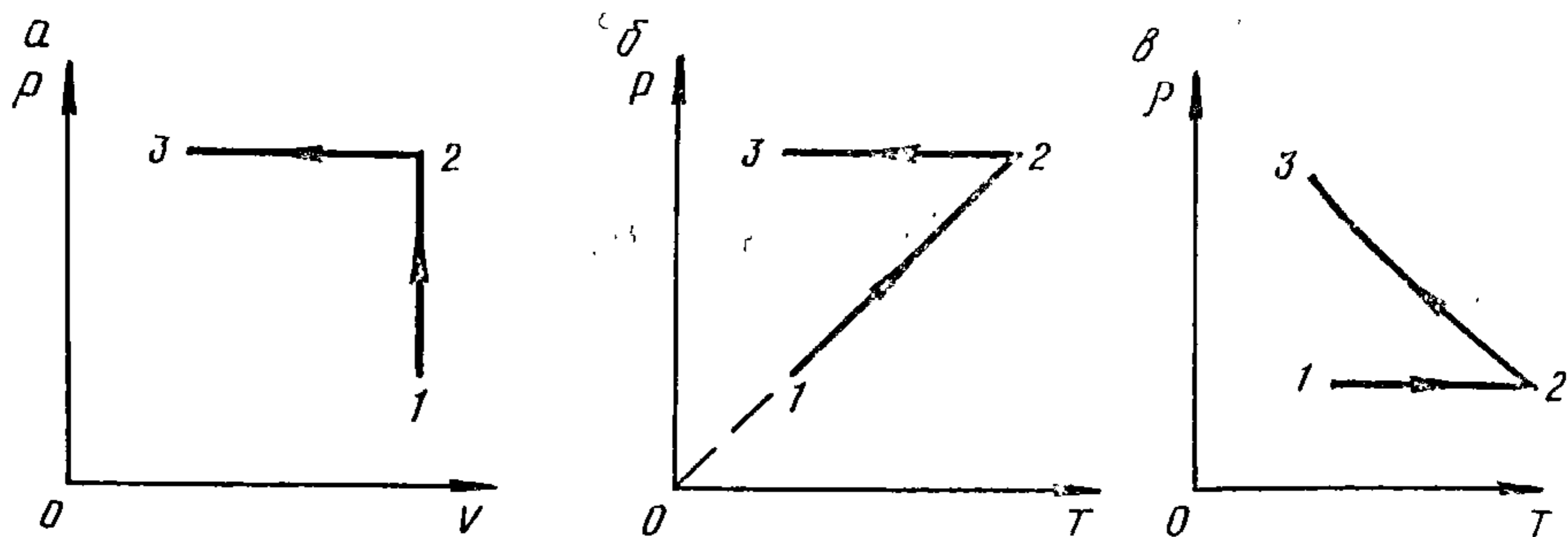


Рис. 8

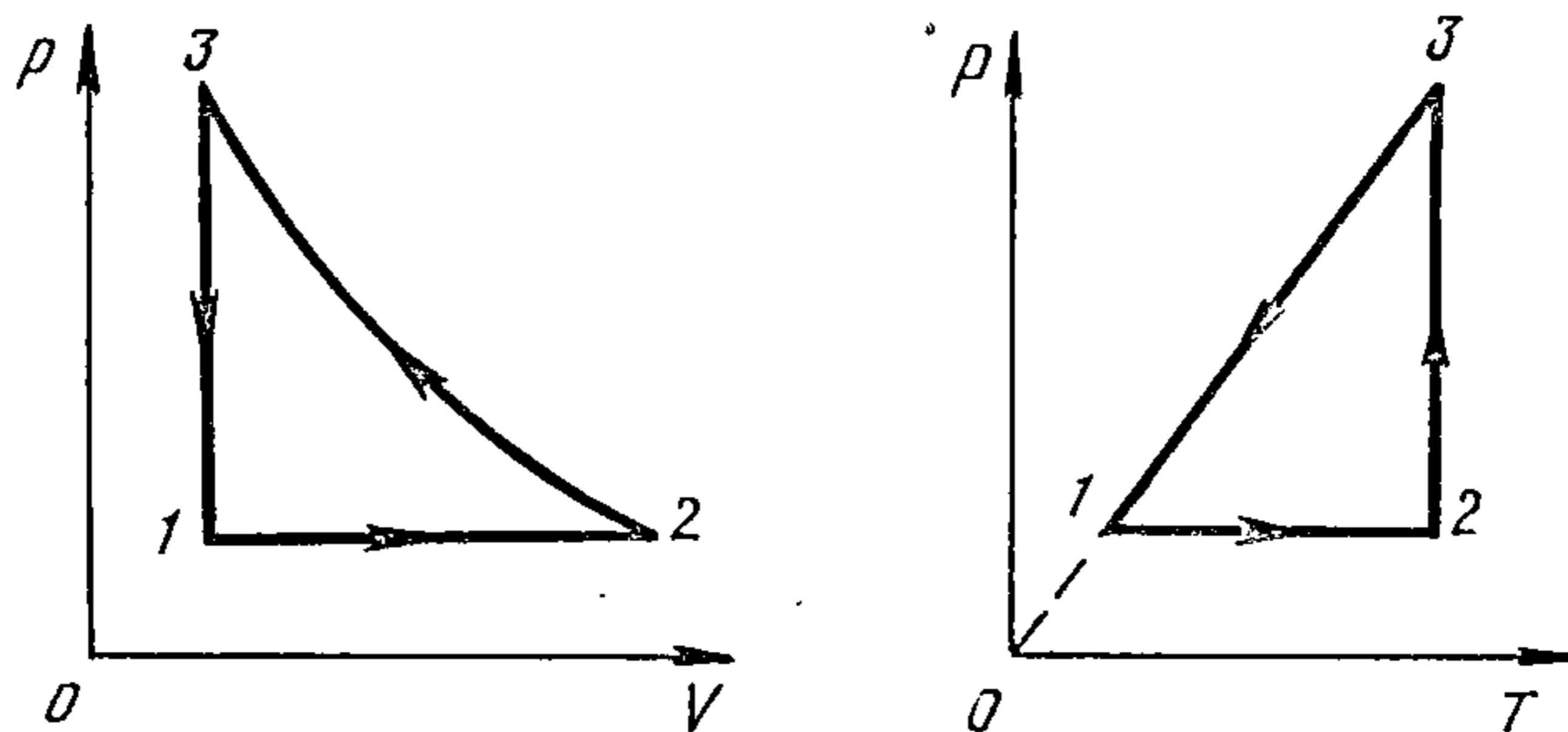


Рис. 9

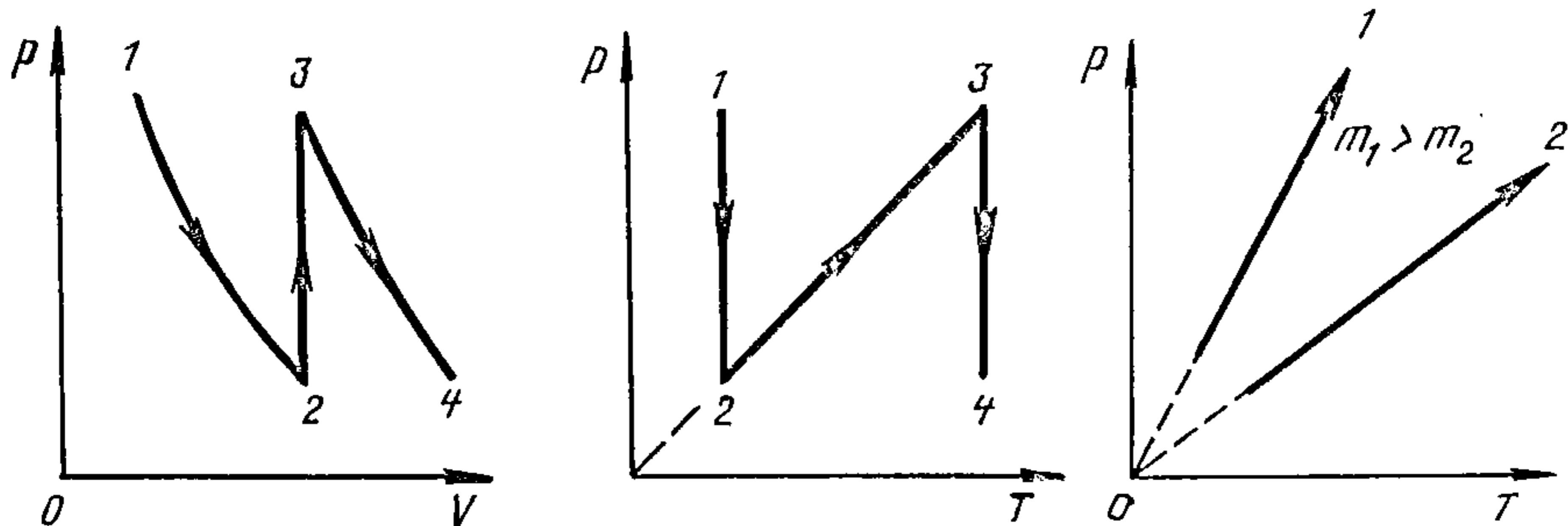


Рис. 10

Рис. 11

11.20. Гл. рис. 8. 11.21. Гл. рис. 9. 11.22. Гл. рис. 10. 11.23.  $M_1 > M_2$ ;  $m_1 < m_2$ . 11.24. Гл. рис. 11. 11.25.  $\Delta p > 0$ ;  $\Delta V < 0$ ;  $\Delta T > 0$ . 11.26. 0,15 см. 11.27.  $h = 2p_0/\rho g = 20,6$  м. 11.28. 625 К. 11.29. 300 К. 11.30. 0,10 дм<sup>3</sup>. 11.31.  $n = 4V/V_0 = 50$ . 11.32.  $n = \ln k / \ln[(V_0 + V)/V_0] = 71$ . 11.33. 5 дм<sup>3</sup>. 11.34.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\mu mg \cos \alpha}{\rho S} + \sqrt{\left(\frac{\mu mg \cos \alpha}{\rho S}\right)^2 + 1} = 1,2.$$

11.35. Барометр будзе даваць правільныя паказанні. 11.36. 99,8 кПа. 11.37.

$$h = h_0 \frac{T}{T_0} \frac{l_0}{l_0 + \frac{1}{2}(h - h_0)}$$

Калі  $(h - h_0)/2 \ll l_0$ , то  $h \approx h_0 T/T_0 = 13$  см. 11.38. У 10 разоў. 11.39.

$$\Delta m = \frac{MV}{RT} \Delta p = 94 \text{ г.}$$

11.40. 0,43 кг. 11.41. 0,028 кг/моль. 11.42.  $\rho = [M(p_0 - p)]/(RT_0) = 17$  г/м<sup>3</sup>.

11.43. 1,2 МПа. 11.44. 0,040 кг/моль. 11.45. 0,029 кг/моль. 11.46. 1,2 м<sup>3</sup>.  
11.47. 24 г; 40 г. 11.48.

$$\rho = \frac{p}{RT} \frac{m_1 + m_2}{m_1/M_1 + m_2/M_2} = 0,24 \text{ кг/м}^3.$$

11.49. 0,53 кг/м<sup>3</sup>. 11.50.  $37 \cdot 10^9$  К. 11.51.  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{6\langle E \rangle}/(im) = 0,40$  км/с.

11.52. 0,35 мм/с; 0,32 мм/с. 11.53. У 3 разы. 11.54. 1000 К. 11.55. 0,2 км/с.

11.56. 0,60 км/с. 11.57. 0,42 км/с. 11.58. 550 м/с. 11.59. 645 м/с; 1,29 км/с.

11.61. 1,9 %. 11.62. 4,4 %; 3 %. 11.63. 1,07. 11.64. 5,53 км. 11.65. 94,6 кПа.

11.66. 1 км. 11.67. 79 кПа;  $2,0 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>. 11.68. 4,2 мм. 11.69. 123 км. 12.1.

64 Тм. 12.2. 0,4 мкм. 12.3. 4,7 Мм. 12.4.  $\langle \lambda \rangle = MV/(\sqrt{2} \pi d^2 m N_A) = 0,21$  мкм.

12.5.  $\rho = M/(\sqrt{2} \pi d^2 \langle \lambda \rangle N_A) = 14$  мг/м<sup>3</sup>. 12.6.  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3\sqrt{2} \pi N_A d^2 p \langle \lambda \rangle}/M =$

$= 0,41$  км/с. 12.7. 94,8 мПа. 12.8. Вакуум высокі, таму што  $\langle \lambda \rangle \gg l$  ( $76 \text{ м} \gg \gg 0,5 \text{ м}$ ). 12.9.  $p \leq 23,8$  мПа. 12.10.

$$\rho \leq \frac{M}{\sqrt{2} \pi d^2 N_A} 3 \sqrt{\frac{\pi}{6V}} = 94 \text{ мкг/м}^3.$$

12.11.

$$\langle \tau \rangle = \frac{1}{4d^2 p} \sqrt{\frac{MkT}{\pi N_A}} = 0,83 \text{ мкс.}$$

12.12.

$$\langle \tau \rangle = \frac{\langle \lambda \rangle p_1}{2p_2 T_1} \sqrt{\frac{\pi M T_2}{2R}} = 20 \text{ мс.}$$

12.13.

$$\langle z \rangle = 4d^2 p \sqrt{\frac{\pi N_A}{MkT}} = 4,7 \text{ Гс}^{-1}$$

12.14.

$$\langle z \rangle = \frac{2\langle v_{\text{кв}} \rangle}{\langle \lambda \rangle} \sqrt{\frac{2}{3\pi}} = 0,20 \text{ Гс}^{-1}.$$

12.15.

$$\langle z \rangle = \frac{p_2}{\langle \lambda_1 \rangle p_1} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 59 \text{ Гс}^{-1}.$$

12.16.

$$\langle z \rangle = \frac{V_1}{\langle \lambda_1 \rangle V_2} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 23 \text{ Гс}^{-1}.$$

12.17.

$$Z_V = 2V \left( \frac{pd}{kT} \right)^2 \sqrt{\frac{\pi RT}{M}} = 2,6 \cdot 10^{32} \text{ с}^{-1}.$$

12.18.  $z_0 = p \sqrt{N_A / (2\pi M kT)} = 3,8 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . 12.19. Павялічыца: 1) У 4 разы; 2) У 2 разы. 12.20.  $92 \text{ мм}^2/\text{с}$ . 12.21.  $14 \text{ мм}^2/\text{с}$ . 12.22.  $89 \text{ мм}^2/\text{с}$ . 12.23.  $15,4 \text{ мм}^2/\text{с}$ . 12.24. Павялічыца ў 2 разы. 12.25.  $20 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ . 12.26.  $14 \text{ мм}^2/\text{с}$ ;  $17 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ . 12.27.  $0,19 \text{ нм}$ . 12.28.  $20,1 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$ . 12.29.  $69 \text{ К}$ . 12.30.  $p \geq 2 \text{ Па}$ . 12.31.

$$\kappa = \frac{i}{2} \frac{R}{M} \eta = 3,78 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

12.32.

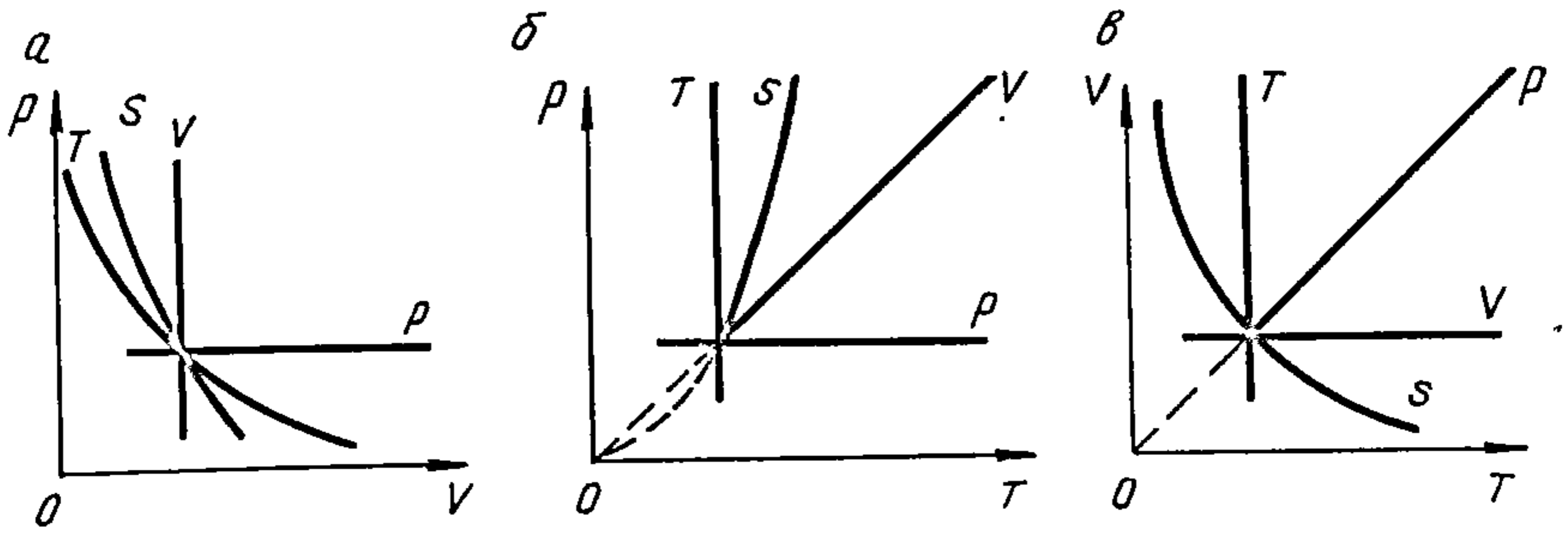
$$\kappa = \frac{ik}{3\pi d^2} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}} = 7 \text{ мВт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

12.33.  $n = 2\kappa / (iDk) = 3,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . 12.34.  $p \leq kT / (\sqrt{2} \pi d^2 D) = 1,7 \text{ Па}$ . 13.1. а)  $C_V = 3/2R$ ,  $C_p = 5/2R$ ,  $\gamma = 1,67$ ; б)  $C_V = 5/2R$ ,  $C_p = 7/2R$ ,  $\gamma = 1,40$ ; в)  $C_V = 7/2R$ ,  $C_p = 9/2R$ ,  $\gamma = 1,29$ ; г)  $C_V = 3R$ ,  $C_p = 4R$ ,  $\gamma = 1,33$ ; д)  $C_V = 6R$ ,  $C_p = 7R$ ,  $\gamma = 1,17$ . 13.2. 5. 13.3.  $0,032 \text{ кг/моль}$ . 13.4.  $c_p = \gamma p / [(\gamma - 1)\rho T] = 1,0 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $c_V = p / [(\gamma - 1)\rho T] = 0,74 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . 13.5. 1,38. 13.6. 2 моль. 13.7.  $c_p = 1,7 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $c_V = 1,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . 13.8.  $1,2 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . 13.9.  $1,0 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $0,72 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . 13.10. 1,4. 13.11. 1)  $C = C_V + R/2$ ; 2)  $C = C_V - R$ . 13.12.  $0,40 \text{ кДж}$ . 13.13.  $0,004 \text{ кг/моль}$ . 13.14.

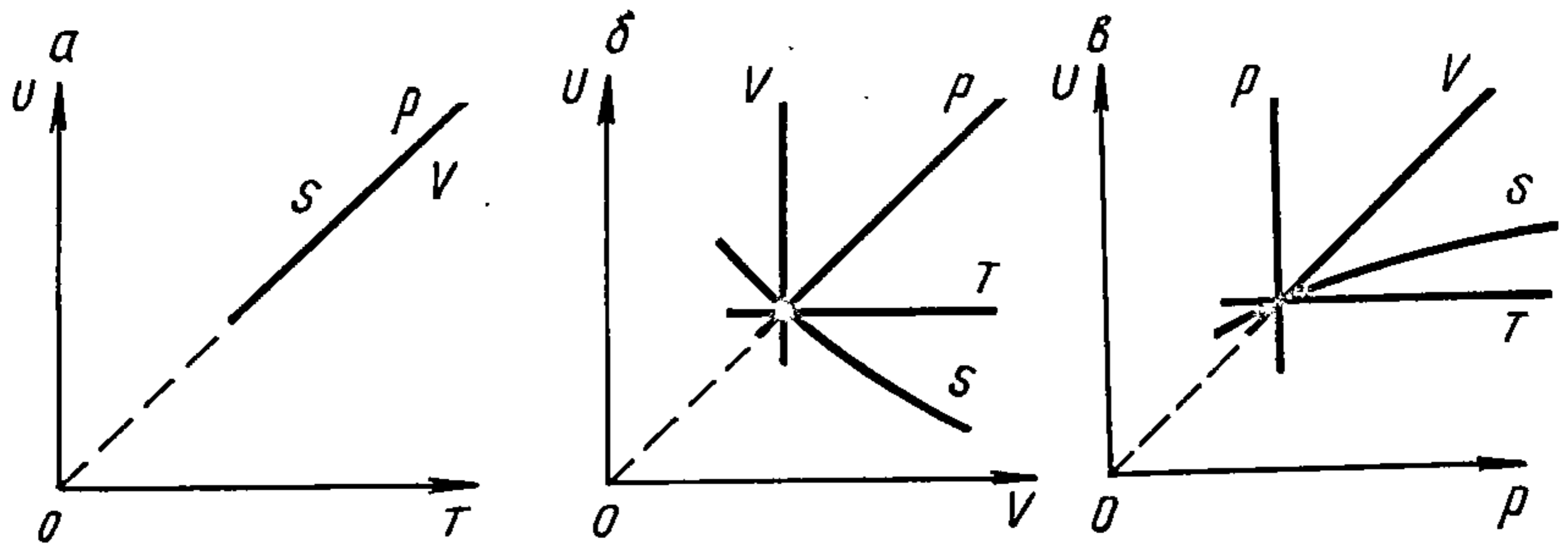
$$Q = \frac{\gamma}{\gamma - 1} pV_1 \left( \frac{V_2}{V_1} - 1 \right) = 4,8 \text{ кДж}.$$

13.15.  $586 \text{ К}$ ;  $4,6 \text{ МПа}$ . 13.16.  $7,5 \text{ кДж}$ . 13.17.  $\Delta F = [\pi Q d^2 (\gamma - 1)] / (4V) = 53 \text{ Н}$ . 13.18. Гл. рыс. 12. 13.19.  $382 \text{ К}$ . 13.20.  $\approx 180 \text{ К}$ . 13.21.  $A'_p > A'_T > A'_S$ , дзе  $A'_S$  — работа, якую выконвае газ пры адыябатычным працэсе. 13.22.  $A_S > A_T > A_p$ . 13.23.  $0,33 \text{ кДж}$ . 13.24.  $0,6 \text{ кДж}$ . 13.25. 1)  $980 \text{ Дж}$ ; 2)  $245 \text{ Дж}$ . 13.26.  $-0,19 \text{ МДж}$ ;  $-0,68 \text{ МДж}$ . 13.27. 1,2 — узрастае; 3 — пастаянная; 4,5 — памяншаецца.





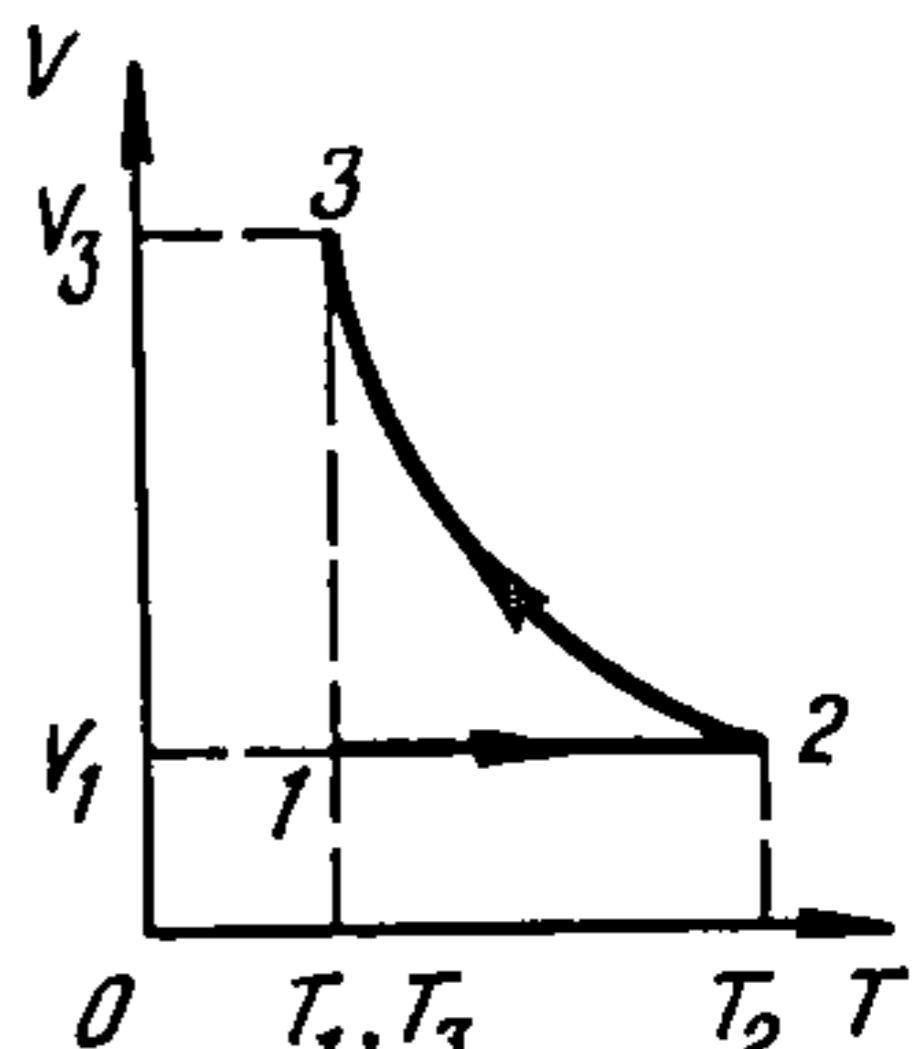
Рыс. 12



Рыс. 13

13.28. Гл. рыс. 13. 13.29.  $A_1' > A_2'$ ;  $\Delta U_1 = \Delta U_2$ ;  $Q_1 > Q_2$ . 13.30.  $A_1' > 0$ ;  $A_2' < 0$ .  
 13.31. 520 Дж; 312 Дж; 208 Дж. 13.32. 3/5; 2/5; 5/7; 2/7; 3/4; 1/4. 13.33.  
 1,5 кДж; 2,25 кДж. 13.34.  $\Delta V = 2\Delta U / (\gamma - 1) = 8 \text{ дм}^3$ . 13.35.  $V$   
 977 К; 5,4 МПа;  $A' = -\Delta U = -1,5 \text{ кДж}$ . 13.36. 2,3 м<sup>3</sup>. 13.37.  
 $\Delta U = (p_2 V_2 - p_1 V_1) / (\gamma - 1) = 1,3 \text{ кДж}$ . 13.38.

$$T = \frac{M(p_2 V_1 - p_1 V_2)^2}{4(p_2 - p_1)(V_1 - V_2)mR} = 496 \text{ К.}$$

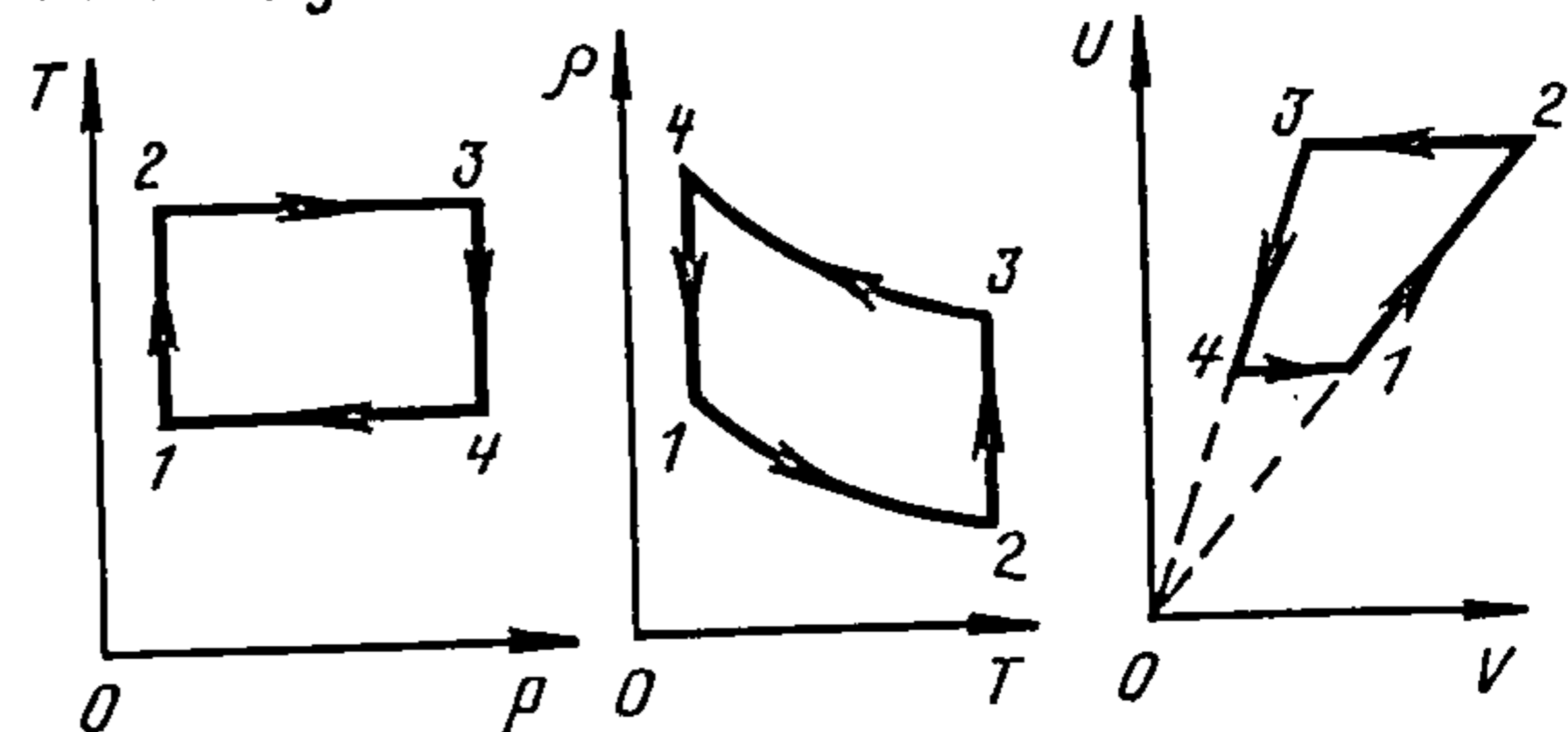


Рыс. 14

13.39.  $A_{12}' > 0, Q_{12} > 0; A_{23}' < 0, Q_{23} < 0$ . 13.40. 1)  $V_2 / V_1 = 2$ ;  
 2)  $T_2 = 222 \text{ К}$ ; 3)  $Q = 148 \text{ Дж}$ ; 4)  $p_3 = 0,5 \text{ МПа}$ . 13.41.  
 0,84 МДж. 13.42.  $T_2 =$

$= 313 \text{ К}$ ;  $V_2 = 45 \text{ дм}^3$ ;  
 $T_3 = 519 \text{ К}$ ;  $V_3 = 74 \text{ дм}^3$ .

13.43. Гл. рыс. 14. 13.44.  
 Гл. рыс. 15;  $A_{12}' > 0$ ;  
 $A_{41}' > 0; A_{23}' < 0; A_{34}' < 0$ .  
 13.45. Гл. рыс. 16;  $\Delta U_{12} =$



Рыс. 15

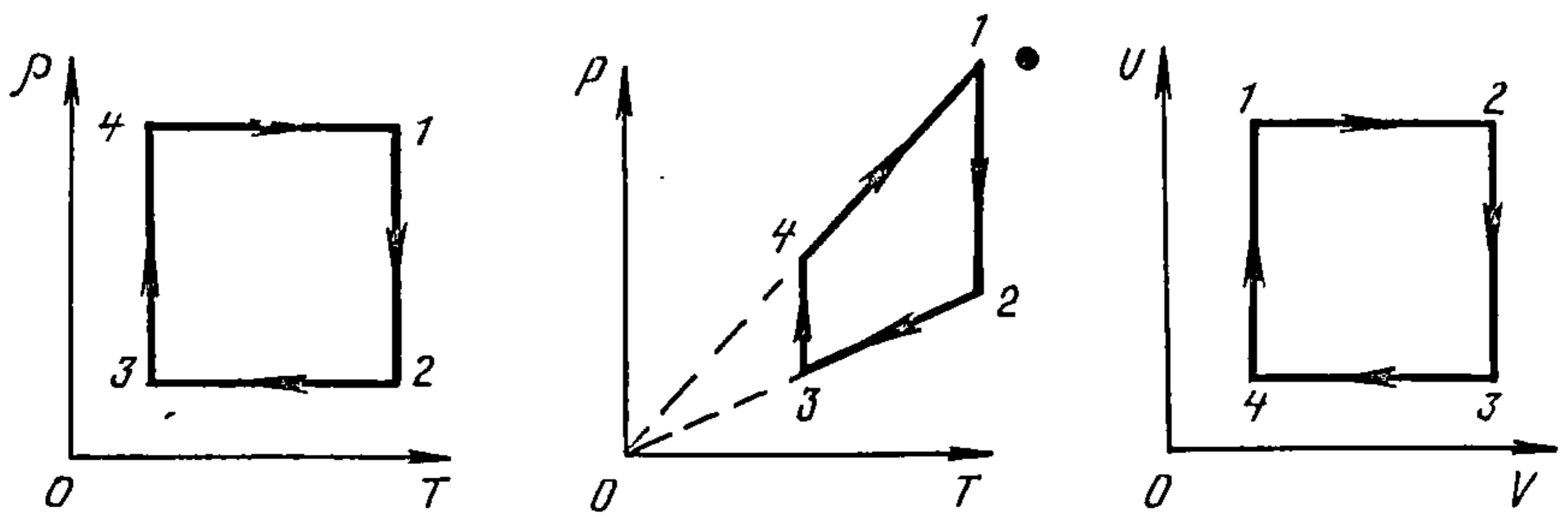


Рис. 16

$= 0, \Delta U_{34} = 0, \Delta U_{23} < 0, \Delta U_{41} > 0$ . 13.46.  $Q_1 = Q - (p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$ . 13.47. 1)  $Q = 36$  кДж,  $\Delta U = 30$  кДж,  $A' = 6$  кДж; 2)  $Q = 34$  кДж,  $\Delta U = 30$  кДж,  $A' = 4$  кДж; 3)  $Q = 32$  кДж,  $\Delta U = 30$  кДж,  $A' = 2$  кДж. 13.48.  $A' = 0$ ;  $A' = 21$  кДж;  $A = -15$  кДж. 13.49.

$$T_{\max} = T \left[ 1 + \frac{mghR}{M(p_0 + p)VC_V} \right] = 306 \text{ К.}$$

13.50.

$$T = \frac{3}{5} T_0 + \frac{2}{5} \frac{p_0 + mg/S}{\nu R};$$

$$V = \frac{2}{5} V_0 + \frac{3}{5} \frac{\nu RT_0}{p_0 + mg/S}.$$

13.51.

$$T_2 = T_1 \frac{1}{1 + R/(4C_V)}; \quad p_2 = \frac{p_1}{2[1 + R/(4C_V)]}.$$

13.52. 482 К. 13.53. 30 м/с. 13.54. 1,16;  $\approx -3,75$  МДж. 13.55. 595 К; 0,62 МДж.

13.56. 1)  $C = -21$  Дж/(моль·К); 2)  $Q = 21$  Дж; 3)  $A = 42$  Дж. 13.57. 1)  $n = -1$ ;

2)  $C = (R/2)((\gamma + 1)/(\gamma - 1))$ ; 3)  $\Delta U = 24p_1V_1/(\gamma - 1)$ ; 4)  $A' = 12p_1V_1$ . 13.58.

767 м/с. 13.59. 398 К. 13.60.  $T = [(\gamma - 1)v^2M]/(2\gamma R) = 4,54$  кК. 13.61.  $v =$

$= v_r \sqrt{2/(\gamma - 1)}$ , где  $v_r = \sqrt{\gamma p/\rho}$ . 13.62.

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} = 119 \text{ К};$$

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{RT_1}{M} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \right]} = 1,37 \text{ км/с.}$$

13.63.

$$\frac{m_0}{m} = \exp \left( v_1 \sqrt{\frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{M}{RT}} \right) = 12,6.$$

13.64. 3,5 К; 74 %. 13.65.  $T_{\max}$  будзе ў крытычным пункце, у якім  $v = 0$ ;

$$T_{\max} = T \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2\gamma} \frac{Mv^2}{RT} \right).$$

13.66.

$$F = \rho v^2 S + pS = \frac{81m^2 RT}{\rho SM} + pS = \frac{81m^2 RT}{\rho SM},$$

дзе  $M$  — малярная маса вадзяной пары;  $\rho$  — шчыльнасць пары. Другі член ва ўраўненні для сілы цягі малы ў параўнанні з першым і яго пры разліках можна не ўлічваць, таму што малы ціск  $p$  газу, які выходзіць з сопла.

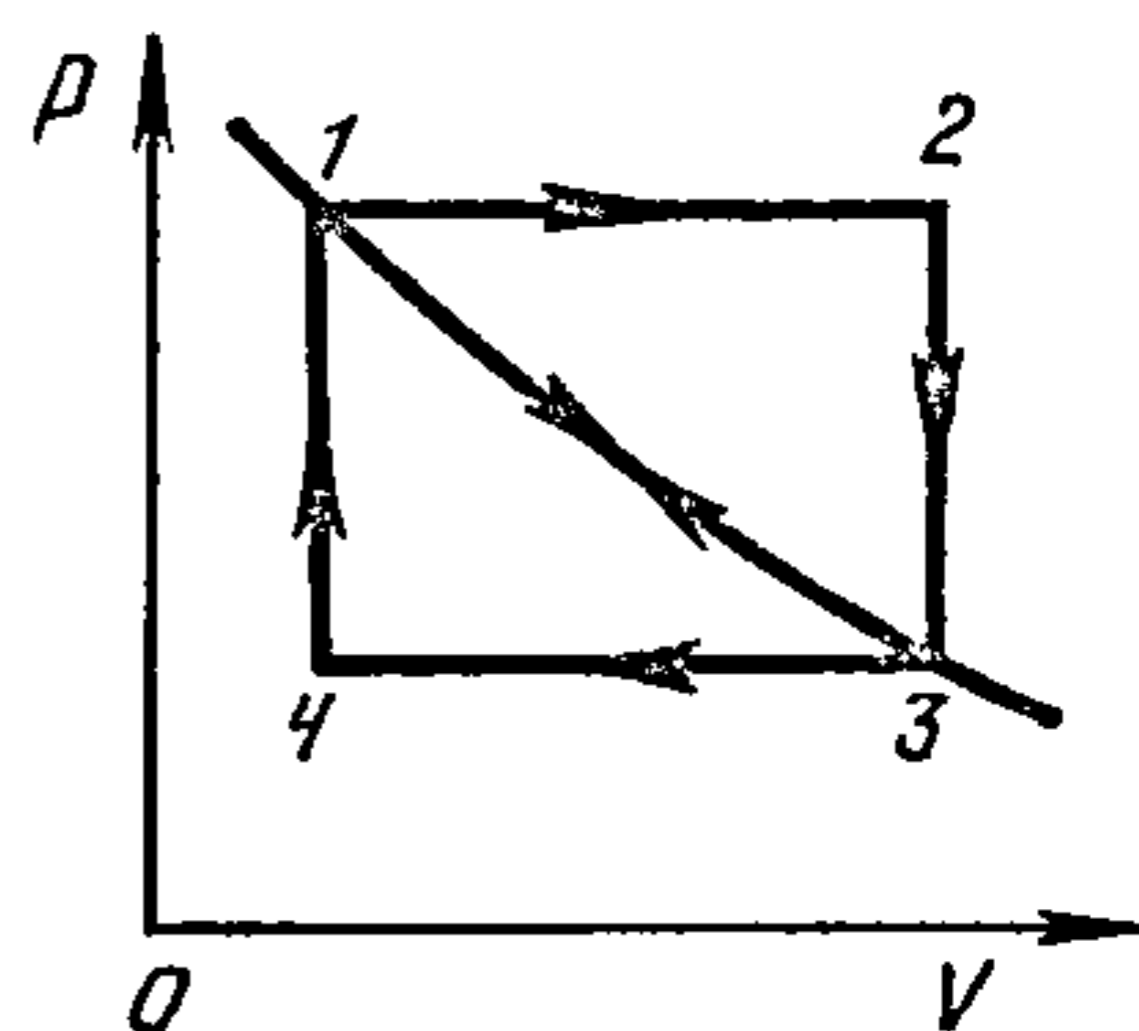
13.67. 0,907 МН. 14.1.  $\eta_{1'-2'-3-4-1'} > \eta_{1-2-3-4-1}$ . 14.2.  $\eta_{1-2-3'-4'-1} > \eta_{1-2-3-4-1}$ . 14.3. 19 %. 14.4. 364 К. 14.5. 1/3. 14.6. У 2 разы. 14.7.  $\eta_2/\eta_1 = T_1/T_2 = 1,4$ . 14.8. 0,26 МВт. 14.9.  $\varepsilon = (1 - \eta)/\eta = 4$ . 14.10. 7,6 кДж. 14.11.

1,06 МДж. 14.12.  $Q = P\tau + c\rho r t + \lambda n\rho$ , дзе  $\rho$  — шчыльнасць вады;  $c$  — удзельная цеплаёмкасць вады;  $\lambda$  — удзельная цеплыня плаўлення лёду. 14.13.  $Q = P(1 + \varepsilon)t = 35$  МДж. 14.14. 5 %. 14.15. 24 %. 14.16. 95 дм<sup>3</sup>. 14.17. -0,18 кДж.

14.18. Пабудуем дыяграму працэсаў  $1-2-3-1$  і  $1-3-4-1$  у каардынатах  $p, V$ . З рыс. 17 відаць,

што плошча фігуры, абмежаванай графікам цыкла  $1-2-3-1$ , большая за плошчу фігуры, абмежаванай графікам цыкла  $1-3-4-1$ . Гэта азначае, што большую работу газ выконвае ў працэсе  $1-2-3-1$ .

14.19. 83 кДж. 14.20.  $\eta_1/\eta_2 = 0,7$ . 14.21.  $A = R(T_1 + T_3 - 2\sqrt{T_1 T_3})$ . 14.22. 17 %. 14.23. 1)  $T_1 = 335$  К,  $T_2 = 391$  К,  $T_4 = 362$  К,  $V_2 = 86$  дм<sup>3</sup>; 2)  $A' = 1,28$  кДж; 3)  $Q_1 = 72,1$  кДж; 4)  $\eta = 2$  %; 5)  $\eta_K = 21$  %. 14.24.



Рыс. 17

$$\eta = \frac{\ln(p_2/p_1) - (1 - p_1/p_2)}{\ln(p_2/p_1) + (1 - p_1/p_2)/(\gamma - 1)} = 9 \text{ \%}.$$

14.25.

$$\eta = 1 - \frac{\gamma [(p_2/p_1)^{1/\gamma} - 1]}{p_2/p_1 - 1} = 9 \text{ \%}.$$

14.26.  $n_1 > n_2$ ;  $\eta_1 > \eta_2$ , дзе  $n_1 = V_1/V_2$ ,  $n_2 = V_1/V_5$ ,  $\eta_1$  — ККДз цыкла

$1-2-3-4-1$ ,  $\eta_2$  — ККДз цыкла  $1-5-6-7-1$ . 14.27.  $\eta = 1 - 1/n^{\gamma-1}$ .

14.28. 45 %. 14.29.  $\eta_{II} > \eta_I$ . 14.30.  $\eta = 1 - (k - 1)/[\gamma n^\gamma (k - 1)]$ . 14.31.  $\eta = 1 - 1/\delta^{(\gamma-1)/\gamma}$ . 14.32.  $\eta = 1/12$ . 14.33. 302 К. 14.34. 1) 1,7 Дж/К; 2) 2,9 Дж/К.



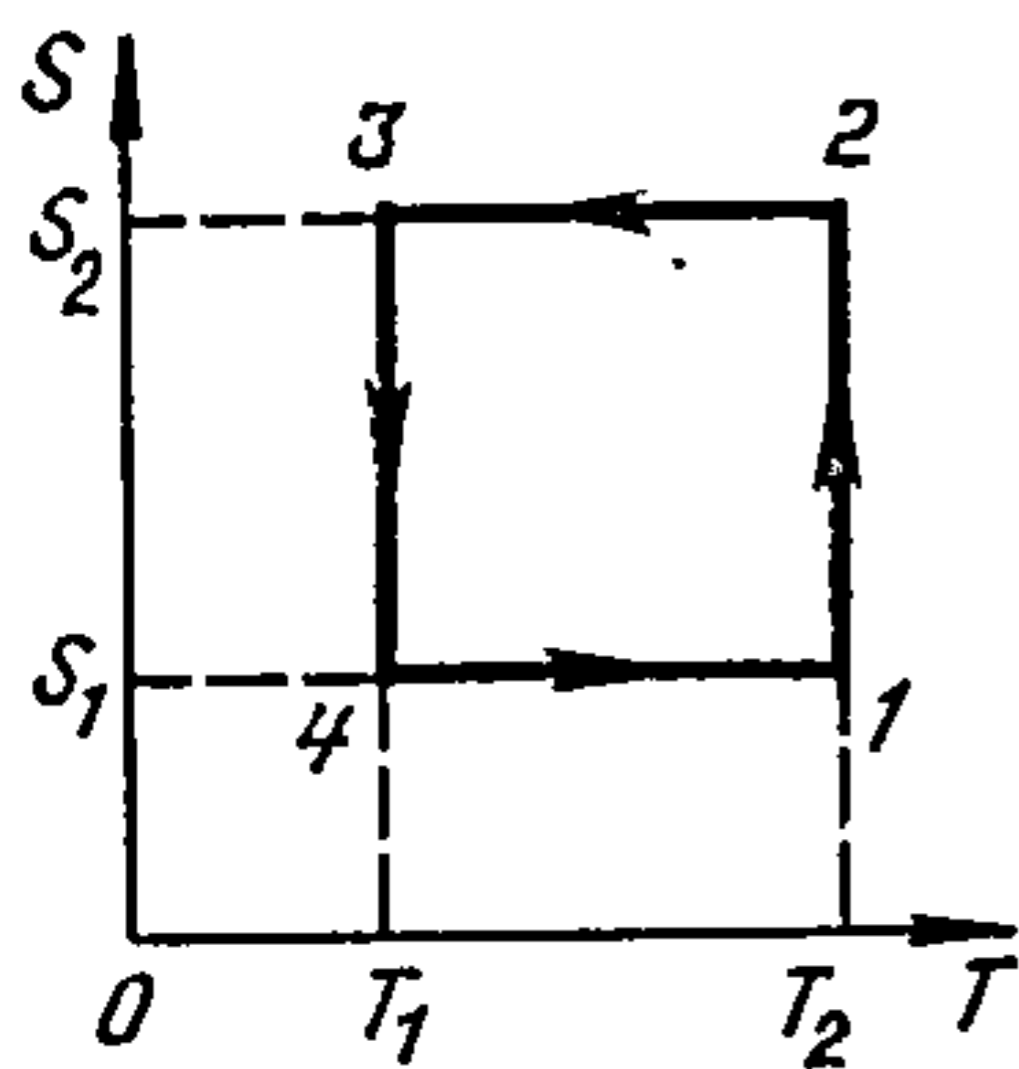


Рис. 18

14.35. 29 Дж/К. 14.36. При ізотермічному стисканні температура не змінюється, а при адиабатним вона збільшується у  $2^{\gamma-1}$  разів. Для абарачальних процесів при адиабатним стисканні ентропія не змінюється ( $S_1 = S_2$ ), а при ізотермічним вона зменшується ( $S_2 < S_1$ ). 14.37. На дияграмі  $S, T$  цикл Карно адлюструється у вигляді прямокутника 1—2—3—4 (рис. 18), де 1—2 і 3—4 — ізотерми, 2—3 і 4—1 —

адиабати. 14.38.  $89 \text{ дм}^3$ . 14.39.  $\Delta S_{\text{H}_2} / \Delta S_{\text{O}_2} = 16$ . 14.40.  $-0,20 \text{ кДж/К}$ . 14.41.

$$\Delta S = (C_p - nC_v) \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

14.43. 90 Дж/К. 14.44. 0,29 кДж/К. 14.45. 0,77 кДж/К. 14.46. 1,6 Дж/К.

14.47. 1,5 кДж/К. 14.48.  $\ln \Omega_1 / \Omega_2 = 4,2 \cdot 10^{23}$ ;  $p_1 / p_2 = 2$ . 14.49.  $1,00 \cdot 10^{10^{20}}$ .

15.1. 301 К; 307 К. 15.2. МПа. 15.3.  $p_i = \rho^2 / M^2 = 1,7 \text{ ГПа}$ . 15.4.  $d = \sqrt[3]{3b / (2\pi N_A)} = 290 \text{ пм}$ . 15.5. 2,5 МПа; 0,18 МПа;  $0,25 \text{ дм}^3$ . 15.6.

$$A = - \frac{m^2 a}{M^2} \left( \frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right) = 1,7 \text{ Дж}.$$

15.7.  $1,92 \text{ Н} \cdot \text{м}^4 / \text{моль}^2$ ;  $0,12 \text{ дм}^3 / \text{моль}$ . 15.8.  $200 \text{ кг/м}^3$ . 15.9.  $25 \text{ кг/м}^3$ . 15.10.  $56,8 \text{ МПа}$ . 15.11. 5,9 г. 15.12.  $94,7 \text{ см}^3$ . 15.13.  $d = \sqrt[3]{3kT_K / (16\pi p_K)} = 293 \text{ пм}$ .

15.14.

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi p}} \left[ 3 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\pi N_A}{b}} \right]^2 = 84 \text{ нм}.$$

15.15. 97,5 нм. 15.16.  $36 \text{ мм}^2 / \text{с}$ . 15.17.  $\tau = T / T_K = 1,5$ . 15.18.  $2,6 \cdot 10^{25}$  молекул. 15.19. 2,5 г. 15.20. 1,2 кг. 15.21. Зменшується на 66 %. 15.22.  $\text{CCl}_4$  при "підвищеному" кипінні випаровується у 25 разів швидше за воду. 15.23. 84,6 кПа. 15.24. 42 К. 15.25.

$$T_2 = \frac{T_1}{1 - \frac{T_1 R}{\lambda M} \ln \frac{p_2}{p_1}} = 375 \text{ К}.$$

15.26.  $3,3 \cdot 10^{28}$  молекул;  $3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ . 15.27.  $3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ ; 310 пм. 15.28. 96 пН. 15.29. 73 мН/м. 15.30. 0,54 мДж. 15.31.  $7,8 \text{ Мг/м}^3$ . 15.32. 0,1 м; 1,5 м. 15.33.  $A = 6\sigma t / (\rho d) = 2,2 \text{ Дж}$ . 15.34.  $Q = 192 \pi r^2 \sigma = 1,2 \text{ мДж}$ . 15.35. 4,1 см. 15.36. 3 см; 1,5 см. 15.37. 64 мН/м. 15.38. 15 см. 15.39. 37,5 мкм. 15.40.  $a = g =$

$= 9,81 \text{ м/с}^2$ . 15.41. Ва ўнутраным капіляры ў  $4/3$  разы вышэй, чым у знешнім. 15.42.  $D = \sqrt[3]{6\sigma d / (\rho g)} = 1,6 \text{ мм}$ . 15.43.  $\sigma = \rho g d h / (4n) = 0,78 \text{ Н/м}$ . 15.44.  $m = \sigma \pi d / g = 28 \text{ мг}$ . 15.45.  $m < 23 \text{ мг}$ ;  $m = 23 \text{ мг}$ ;  $m > 23 \text{ мг}$ . 15.46.  $R_1 = d/2 = 0,5 \text{ мм}$ ; 1)  $R_2 = \sigma \pi d^2 / [2(\sigma \pi d - mg)] = 2,2 \text{ мм}$ ; 2)  $R_2 = \infty$ ; 3)  $R_2 = \sigma \pi d^2 / [2(mg - \sigma \pi d)] = 1,1 \text{ мм}$ . 15.47.  $l \leq 4,35 \text{ см}$ . 15.48.  $h \geq 2,8 \text{ см}$ . 15.49.  $\sigma = [g(\pi d^2 \rho - 4m)] / (8\pi d) = 33 \text{ мН/м}$ . 15.50.  $h = [4(mg + \sigma \pi d)] / (\rho g \pi d^2) = 3,8 \text{ см}$ . 15.51.  $0,45 \text{ г}$ . 15.52.  $\rho = 2\sigma / (ghd) = 0,85 \text{ Мг/м}^3$ . 15.53.

$$F = \frac{\sigma m}{\rho d} \left( \sqrt{\frac{\pi \rho d}{m}} + \frac{2}{d} \right) = 10 \text{ Н.}$$

15.54.

$$h = \frac{p}{\rho g} - \frac{4\sigma}{\rho g d} = 744 \text{ мм}; \quad d = \frac{4\sigma}{\Delta p} = 15 \text{ см.}$$

15.55.  $p = 101 \text{ кПа}$ . 15.56.

$$\sigma = \frac{\rho g \Delta h}{4(1/d_1 - 1/d_2)} = 73 \text{ мН/м.}$$

15.57.  $0,5 \text{ Н/м}$ . 15.58.  $750 \text{ кПа}$ . Помпа павінна быць далучана да вузкага канала манометра. 15.59.  $0,4 \text{ мкм}$ . 15.60.  $\Delta p = 36 \text{ Па}$ ;

$$\rho = \frac{M}{RT} \left( p_0 + \frac{8\sigma}{d} \right) = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

15.61.  $2,3 \text{ мДж}$ . 15.62.  $1 \text{ мВт}$ . 15.63. 1) Малая бурбалка будзе памяншацца, а вялікая — павялічвацца; 2)  $\Delta r = 0,8 \text{ см}$ . 15.64.  $4,7 \text{ мДж}$ . 15.65.  $1,0 \text{ мК}^{-1}$ . 15.66.  $\rho_2 = \rho_1 / (1 - k\Delta p)$ . 15.67.  $46 \text{ МПа}$ . 15.68.  $3 \text{ мм/с}$ . 15.69.  $0,97 \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ .

15.70.  $5 \cdot 10^{22} \text{ дм}^{-3}$ . 15.71.  $\text{На } 82 \text{ К}$ . 15.72.  $0,18 \text{ МПа}$ . 15.73.  $32 \%$ . 15.74.  $1,7 \text{ м}$ .

16.1.  $1,4$ . 16.2.  $17 \text{ мК}^{-1}$ ;  $14 \text{ }^\circ\text{С}$ . 16.3.  $T = T_0 \sqrt{1 + \alpha t}$ . 16.4.  $12,6 \text{ кН}$ . 16.5.

$68 \text{ см}^3$ ;  $54 \text{ см}^3$ . 16.6.  $100,7 \text{ кПа}$ . 16.7.  $925 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $390 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;

$128 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . 16.8.  $670 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $675 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . 16.9.  $28 \text{ см}$ . 16.10.  $359 \text{ К}$ .

16.11.  $5,9 \text{ кг}$ . 16.12.  $473 \text{ К}$ . 16.13.  $Q = (t_1 - t_4) \tau S / (1/\alpha_1 + 1/\kappa + 1/\alpha_2) = 30 \text{ Дж}$ ;

$t_2 = t_1 - Q / (\alpha_1 \tau S) = 18 \text{ }^\circ\text{С}$ ;  $t_3 = t_4 + Q / (\alpha_2 \tau S) = -15 \text{ }^\circ\text{С}$ . 16.14. 1)  $t = -2 \text{ }^\circ\text{С}$ ; 2)

$t = 19 \text{ }^\circ\text{С}$ . Найвыгаднейшы варыянт 2;  $\eta = 51 \%$ . 16.15.  $Q = (t_1 - t_5) \tau S / (1/\alpha_1 +$

$+ 1/\kappa_1 + 1/\kappa_2 + 1/\alpha_2) = 26 \text{ кДж}$ . 16.16.  $l = \lambda [(t_1 - t_5) \tau S / Q_2 - (1/\alpha_1 + 1/\kappa_1 +$

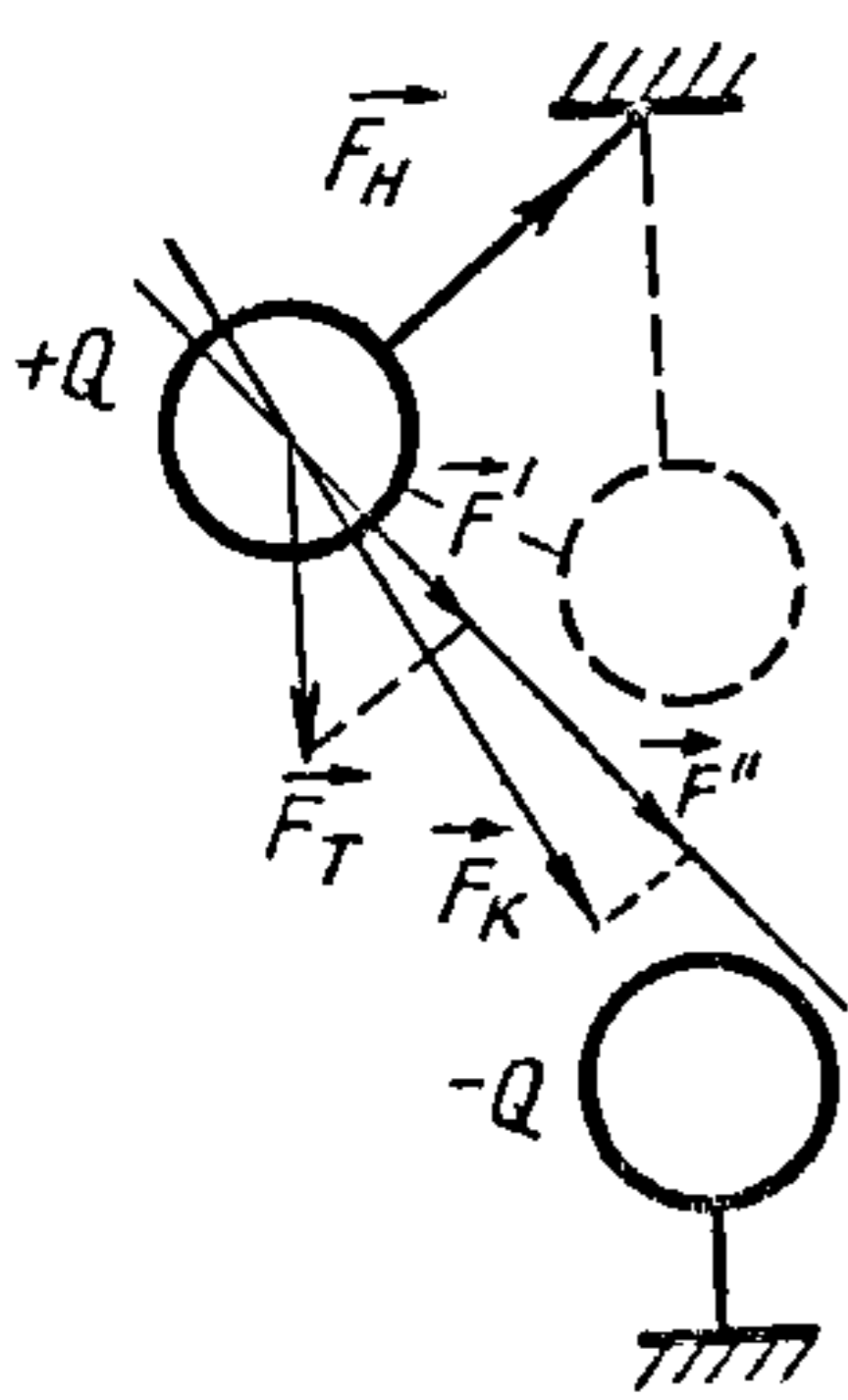
$+ 1/\alpha_2)] = 0,63 \text{ мм}$ . 16.17.  $5,3 \text{ МПа}$ . 16.18.  $-0,082 \text{ }^\circ\text{С}$ . 16.19.  $-50 \text{ Дж/К}$ . 16.20.

$2,6 \text{ кДж/К}$ . 16.21.  $2,1 \text{ кДж/К}$ . 16.22.  $20 \text{ Дж/К}$ . 16.23.  $\Delta T = -0,8 \text{ К}$ ;  $\Delta m / m =$

$= 5 \cdot 10^{-3}$ . 16.24.  $0,13 \text{ мДж/кг}$ .

## ЭЛЕКТРЫЧНАСЦЬ І МАГНЕТЫЗМ

17.1.  $x = l\sqrt{Q_2} / (\sqrt{Q_1} - \sqrt{Q_2}) = 3,5$  см ад зарада  $Q_1$ ;  $l - x = 2,55$  см ад зарада  $Q_2$ . 17.2. Акрамя сілы цяжару  $\vec{F}_ц$  і сілы нацяжэння ніці  $\vec{F}_н$ , на зараджаны



Рыс. 19

шарык маятніка дзейнічае яшчэ электрычная сіла  $\vec{F}_к$  прыцяжэння да процілегла зараджанага шарыка, які знаходзіцца ніжэй. Гэтая сіла, як і сіла цяжару, будзе даваць складаючую на напрамак руху, што павялічыць вяртаючую сілу:  $\vec{F} = \vec{F}' + \vec{F}''$  (рыс. 19). Пры гэтым павялічыцца сярэдняе значэнне паскарэння маятніка, а перыяд адпаведна паменшыцца. Стан раўнавагі маятніка застанецца вертыкальным. 17.3.

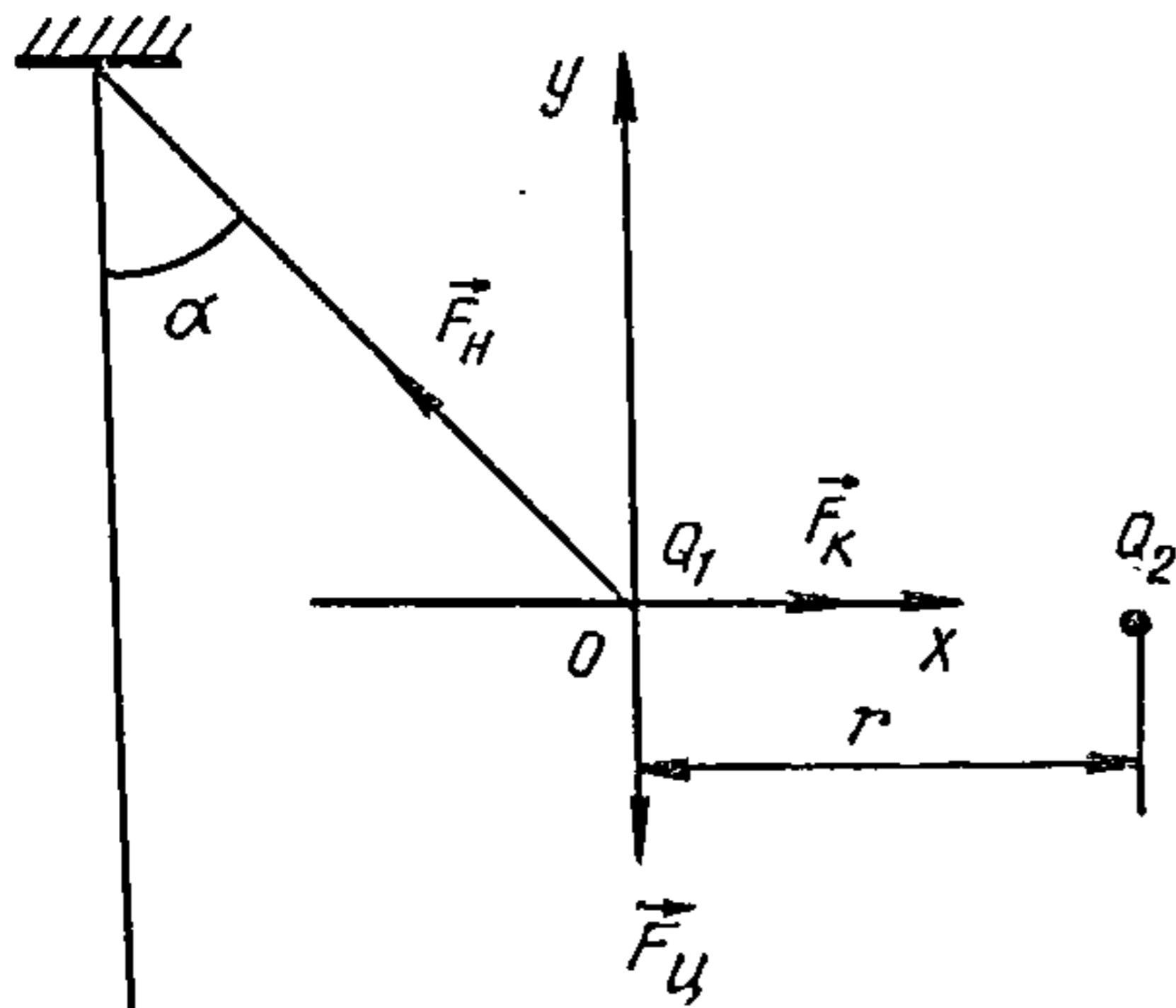
$$F = 2 \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \frac{\alpha}{2} = 0,59 \text{ нН.}$$

17.4.

$$F = \frac{Q_3}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{Q_1^2}{a^4} + \frac{Q_2^2}{b^4} - \frac{Q_1 Q_2}{a^3 b^3}} (G^2 - a^2 - b^2) \approx 0,77 \text{ мН.}$$

17.5.  $Q = 263$  нКл. 17.6.  $F_1 = 1,39$  мН;  $F_2 = 5,89$  мН. 17.7.  $Q = 18,27$  нКл. 17.8.

$Q_1 \geq 4\pi\epsilon_0 d^2 mg / Q$  — у раўнавазе;  $Q_1' \geq 8\pi\epsilon_0 d^2 mg / Q$  — ва ўстойлівай



Рыс. 20

раўнавазе. 17.9. Умова раўнавагі сістэмы:  $\vec{m}g + \vec{F}_к + \vec{F}_н = 0$ . Паколькі ўсе сілы, якія дзейнічаюць на адхілены шарык, ляжаць у адной плоскасці, возьмем прамавугольную сістэму каардынат  $XOY$ , сумясціўшы яе пачатак з цэнтрам шарыка (рыс. 20). Адлюстравім сілы на адпаведныя восі і ўлічваючы знакі адлюстраванняў, запішам умову раўнавагі для шарыка:

$$\begin{aligned} \Sigma F_X = 0; & F_K - F_H \sin \alpha = 0, \text{ ці } F_K = F_H \sin \alpha; \\ \Sigma F_Y = 0; & F_H \cos \alpha - mg = 0, \text{ ці } mg = F_H \cos \alpha. \end{aligned}$$

Умова раўнавагі дае:  $F_K = mgtg\alpha$ .

Па закону Кулона:  $F_K = Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$  і

$$Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2) = mgtg\alpha, \text{ адгэтуль } Q_2 = 4\pi\epsilon_0 r^2 mgtg\alpha / Q_1 = 56 \text{ нКл. 17.10.}$$

$$Q = 8l \sqrt{\pi\epsilon_0 mg \frac{\sin^3(\alpha/2)}{\cos(\alpha/2)}} \approx 45 \text{ нКл.}$$



17.11.

$$Q^2 = \frac{16\pi\epsilon_0 mgl^2 \sin^3(\alpha/2)}{\cos\beta\sqrt{3 - 4\sin^2(\alpha/2)}} \approx 64,5 \cdot 10^{-14} \text{ Кл}^2,$$

дзе  $\beta = 30^\circ$ , паколькі ў аснове роўнастаронні трохвугольнік,  $Q \approx 0,8$  мкКл.

17.12. Ураўненне руху

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

$$\text{адсюль } v = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2}{mr}} \approx 2,2 \text{ Мм/с};$$

$$a = v^2/r \approx 9,2 \cdot 10^{22} \text{ м/с}^2.$$

17.13.

$$Q = \frac{r}{\sin\alpha} \sqrt{2\pi\epsilon_0 m \left( \frac{g}{\cos\alpha} - \frac{\omega^2 r}{\sin\alpha} \right)} = 0,13 \text{ мкКл.}$$

17.14. Сіла, з якой узаемадзейнічаюць зарады  $Q_1$  і  $Q_2$ , па закону Кулона адваротна прапарцыянальная квадрату адлегласці паміж імі. Аднолькавая залежнасць сілы прыцягнення паміж планетамі і Сонцам. Паводле трэцяга закону Кеплера квадраты перыядаў абарачэння планет вакол Сонца адносяцца як кубы вялікіх паўвосей арбіт. Відавочна, закон Кеплера справядлівы і для руху зарада  $Q_1$  вакол замацаванага зарада  $Q_2$ . Такім чынам, калі мы знойдзем перыяд абарачэння зарада па акружнасці любога заданага радыуса, то гэтым самым атрымаем адказ на пытанне задачы. Відавочна, што часцінкі, траекторыі якіх маюць аднолькавыя вялікія паўвосі, маюць і аднолькавыя перыяды абарачэння па гэтых траекторыях. Гэта азначае, што перыяд абарачэння часцінкі ў дадзенай задачы роўны перыяду абарачэння часцінкі па акружнасці радыусам  $(R+r)/2$ . Знойдзем яго. Пры перамяшчэнні зарада  $Q_1$  па акружнасці радыусам  $(R+r)/2$  цэнтрабежнае паскарэнне  $a_{ц} = \omega^2 [(R+r)/2]$  яму надае кулонаўская сіла:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{((R+r)/2)^2}.$$

Значыць,

$$m\omega^2 \left( \frac{R+r}{2} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{(R+r)/2},$$

$$\text{адсюль } \omega = \sqrt{\frac{2Q_1 Q_2}{\pi\epsilon_0 m (R+r)^3}};$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{\pi \epsilon_0 m (R+r)^3}{2Q_1 Q_2}}$$

17.15.

$$h = \frac{Q \sqrt{\pi \epsilon_0 m g}}{4\pi \epsilon_0 m g} - \frac{3mg}{k} = 20 \text{ см.}$$

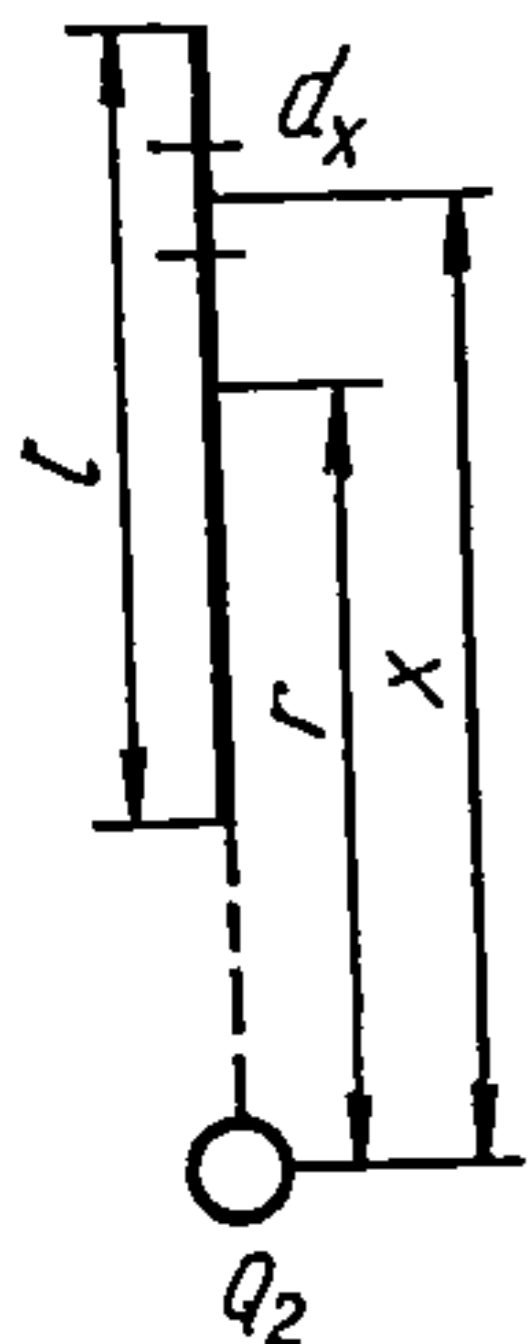


Рис. 21

17.16. Лінійна щільність зарада на участку  $dx$  роўная  $\tau = Q/l$ , зарад  $dQ = \tau dx$  (рыс. 21). Сіла  $dF = Q_2 \tau dx / (4\pi \epsilon_0 x^2)$ , дзе  $x$  — адлегласць паміж зарадамі. Агульная сіла

$$F = \int_{r-l/2}^{r+l/2} \frac{Q_2 \tau dx}{4\pi \epsilon_0 x^2} = \frac{Q_2 \tau}{4\pi \epsilon_0} \int_{r-l/2}^{r+l/2} \frac{dx}{x^2} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi \epsilon_0 (r^2 - l^2/4)}, \text{ адкуль}$$

$$Q_2 = \frac{\pi \epsilon_0 F (4r^2 - l^2)}{Q_1} = 76,2 \text{ фКл.}$$

17.17. З рыс. 22 відаць, што  $\Delta F = 2F_H \sin(\alpha/2)$ , а  $F = Q_2 \Delta Q / (4\pi \epsilon_0 R^2)$ , дзе  $\Delta Q$  — зарад на ўчастку дугі  $\Delta l$ . Для малых вуглоў  $\Delta F = F_H \alpha$ . Прымаючы  $\Delta Q = (Q_1 / 4\pi) \alpha$ , атрымаем:  $F_H = Q_1 Q_2 / (8\pi^2 \epsilon_0 R^2) = 0,7 \text{ мН}$ .

17.18.  $F = \int dF \cos \alpha = Q_1 Q_2 r / [4\pi \epsilon_0 (R^2 + r^2)^{3/2}] = 28,3 \text{ мкН}$ .

17.19.

$$l = 3 \sqrt{\frac{Q_1 Q_2 R}{4\pi \epsilon_0 m g}} = 7,2 \text{ см.}$$

17.20.

$$a = g \pm \frac{\tau Q_1 R h}{2m \epsilon_0 (R^2 + h^2)^{3/2}},$$

дзе "+" ("−") у выпадку дадатнага (ад-

моўнага) зарада  $Q_1$  і  $a$  адпаведна роўнае 11,2 і 8,4 м/с<sup>2</sup>.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2 + (QE/m)^2}}} = 1,05 \text{ с.}$$

17.22.  $E = [F_H - mg(3 - 2\cos \alpha)] / (2Q \sin \alpha) \approx 46 \text{ кВ/м}$ .

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l \cos \alpha}{g - QE/m}} = 3,3 \text{ с.}$$

17.24.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \sqrt{\frac{Q_1^2}{r_1^4} + \frac{Q_2^2}{r_2^4} - \frac{Q_1 Q_2 (r_1^2 + r_2^2 - r^2)}{r_1^3 r_2^3}} \approx 35 \text{ кВ/м.}$$

17.25.

$$E_1 = \frac{4,4Q_1}{\pi\epsilon_0 l^2} = 1,43 \text{ мВ/м;}$$

$$E_2 = \frac{2Q_1}{\pi\epsilon_0 l^2} = 648 \text{ кВ/м;}$$

$$E_3 = \frac{0,93Q_1}{\pi\epsilon_0 l^2} = 300 \text{ кВ/м;}$$

$$E_4 = \frac{\sqrt{2}Q_1}{2\pi\epsilon_0 l^2} = 230 \text{ кВ/м.}$$

17.26.

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Qx}{(l^2/4 + x^2)^{3/2}}.$$

Гэтая формула выражае модуль  $|\vec{E}|$  у адвольным пункце як функцыю каардынаты гэтага пункта. Пасля дыферанцыравання па  $x$  знаходзім  $x_{1,2} = \pm l/(2\sqrt{2}) = \pm 1,8 \text{ см.}$  Два значэнні  $x$  адпавядаюць пунктам, размешчаным па абодва бакі ад цэнтры сіметрыі пункта  $O$ . 17.27. Можна.  $d = 4\alpha/(\epsilon_0 E^2) = 3,7 \text{ мм.}$  17.28. 0; 3,7 кВ/м; 2,8 кВ/м. 17.29.  $E = \tau/(4\pi\epsilon_0 r) = 4,5 \text{ В/м.}$  17.30.

$$F = \tau^2 / (4\pi\epsilon_0 D) = 1 \text{ мкН. 17.31.}$$

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r \sqrt{4r^2 + l^2}} = 3,5 \text{ кВ/м.}$$

17.32.  $E = \tau/(2\pi\epsilon_0 R)$ . 17.33.  $E = \tau R h / [2\epsilon_0 (R^2 + h^2)^{3/2}]$ ;  $E = 0$ ;  $E_{\max}$  пры  $h = R\sqrt{2}/2$ ;  $E_{\min}$  пры  $h \rightarrow \infty$ . 17.34.  $E_1 = Q/(2\pi^2\epsilon_0 R^2) = 576 \text{ кВ/м.}$   $E_2 = Q/(2\pi^2\epsilon_0 R^2) \cos(\pi/6) = 496 \text{ кВ/м.}$  17.35.

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left[ 1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + R^2}} \right];$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}; E_{\max} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \text{ пры } h = 0; E \rightarrow 0 \text{ пры } h \rightarrow \infty.$$

17.36.

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 R^2} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1+(R/l)^2}} \right] = 40,5 \text{ В/м.}$$



17.37.  $\varphi = Q / [2\pi\epsilon_0 (R_2 + R_1)] = 18$  кВ. 17.38. Як відаць з рис. 23, патэнцыял поля ў пункце А

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2; \quad d\varphi_1 = -E dr_2 = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \frac{dr_1}{r_1};$$

$$\varphi_1 = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dr_1}{r_1} = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln r_1 + C_1.$$

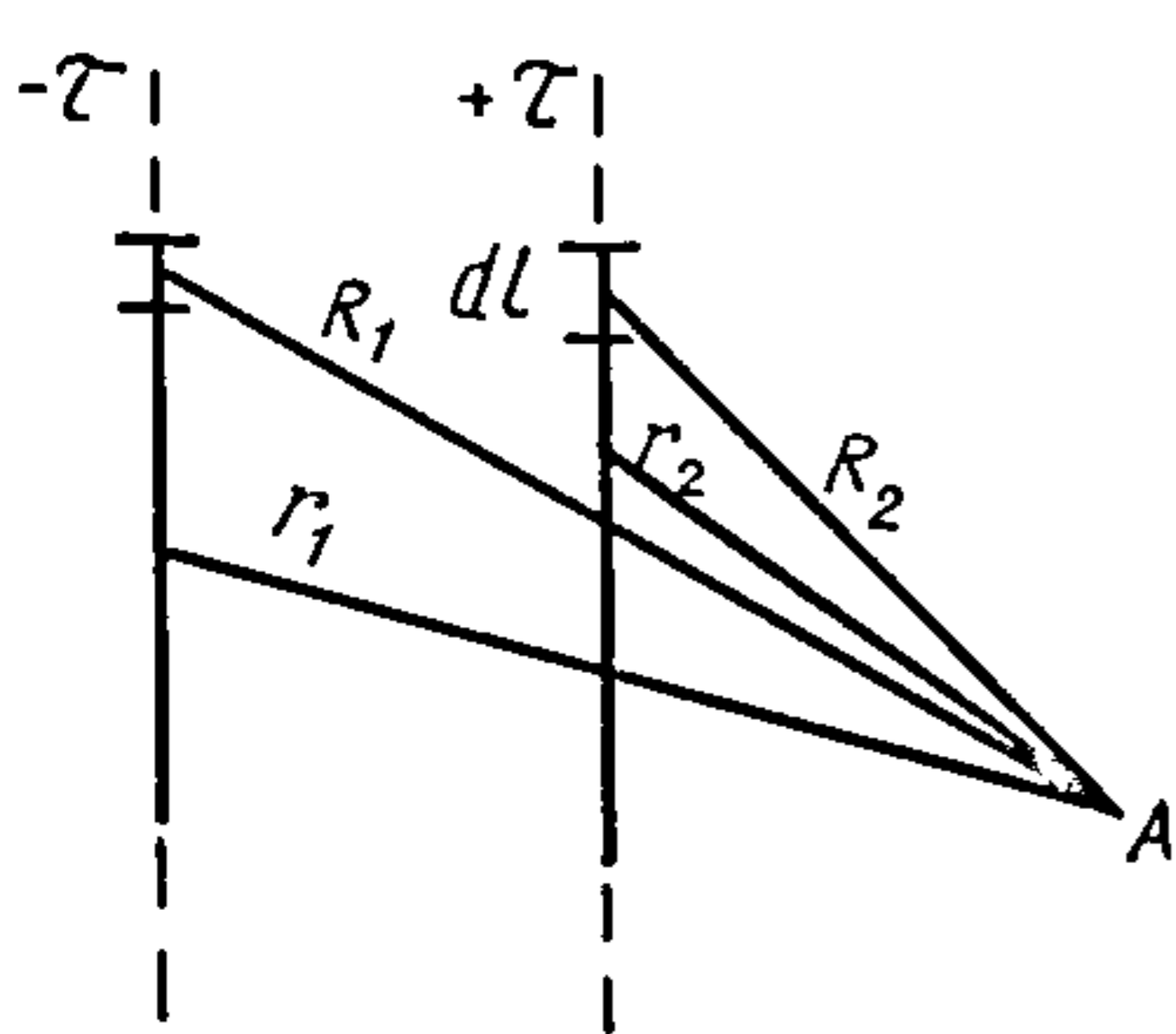


Рис. 23

Аналагічна знойдзем  $\varphi_2$ . Улічваючы, што  $C_1 = C_2$ , атрымаем:

$$\varphi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

17.39.  $\varphi = \sigma (\sqrt{R_2^2 + r^2} - \sqrt{R_1^2 + r^2}) / (2\epsilon_0 \epsilon)$ . 17.40.

$R_1 = R_0 Q / (Q - 4\pi\epsilon_0 \Delta\varphi R) = 24,5$  мм — радыус першай эквіпатэнцыяльнай паверхні. У агульным выглядзе для любой эквіпатэнцыяльнай паверхні  $R_n = R_0 Q / (Q - n4\pi\epsilon_0 \Delta\varphi R_0)$ , дзе  $n =$

$= 1, 2, 3, 4, 5$ . 17.41. Для радыуса любой эквіпатэнцыяльнай паверхні  $R_n = R_0 / (1 - 0,1n)$ , дзе  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, 9$ .  $R_1 = R_0 = 1$  см;  $R_2 = 1,11$  см;  $R_3 = 1,25$  см і г.д. 17.42. Пры  $\varphi_A = 0$  маем  $\varphi_B = -25$  В,  $\varphi_D = -75$  В; калі  $\varphi_C = 0$ , то  $\varphi_B = 25$  В,  $\varphi_D = -25$  В; пры  $\varphi_E = 0$  маем  $\varphi_B = 75$  В,  $\varphi_D = 25$  В. 17.43.  $l_2 = l_1^2 E_1 / (l_1 E_1 - \Delta U) = 31,2$  мм;  $l_2' = l_1^2 E_1 / (\Delta U + l_1 E_1) = 21$  мм. 17.44.  $\varphi = n\varphi_1 / \sqrt[3]{n}$ . 17.45.  $\varphi_1 = \varphi_2$  (гэта азначае, што патэнцыял усюды аднолькавы і роўны патэнцыялу на паверхні);  $\varphi_2 = 180$  В;  $\varphi_3 = 90$  В. 17.46.

$$A = \frac{Q_3 (Q_2 - Q_1)}{4\pi\epsilon_0} \frac{l_2 - l_1}{l_1 l_2} = 0,3 \text{ мДж.}$$

17.47.  $A = 3mgh \approx 0,3$  мДж. 17.48.  $A = -\sqrt{k [Q^2 / (4\pi\epsilon_0)]^2 / 2} = -64,3$  мДж. 17.50.

$$F = \frac{Q^2 R}{4\pi\epsilon_0} \frac{(l_2 + l_1) \sqrt{l_1^4 + l_2^4}}{(l_1 l_2)^3}.$$

17.51.  $Q_1 = -(R/r)Q_2$  (знак «-» паказвае, што зарад  $Q_1$  процілеглы па знаку зараду  $Q_2$ ). 17.52.  $F = Q_2 / [4\pi\epsilon_0 (2l)^2] \approx 0,36$  мН. 17.53.  $\varphi = Q / (4\pi\epsilon_0 r)$ . 17.54.  $\varphi = (Q_1 - Q_2) / (4\pi\epsilon_0 r)$ . 17.55. Электрычнае поле ўнутры і па-за сферай роўнае полю пунктавага зараду  $Q$ , размешчанага ў яе цэнтры; электрычнае поле адсутнічае ўсюды, акрамя вобласці ўнутры сферы. 17.56.  $\sigma = \sigma_0 \cos\alpha$ .

17.57.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Q(l-2r)}{r(l-r)} = 3,6 \text{ кВ.}$$

17.58.  $\sigma'_1 = \sigma''_1 = Q/(2S)$  — пласціны 1;  $\sigma'_2 = -\sigma''_2 = -Q/(2S)$  — пласціны 2.

17.59.  $\Delta\varphi = Q(l_1 - l_2)/(2\epsilon_0 S)$ . 17.60.  $E = \rho a/(3\epsilon_0)$ . 17.61.  $T = 2\pi\sqrt{lm/(2QE)} \approx \approx 20 \text{ пс.}$  17.62.

$$Q_2 = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon} Q_1 = 180 \text{ нКл.} \quad \sigma = \frac{\epsilon - 1}{\epsilon} \frac{Q_2}{4\pi R^2} = 5,7 \text{ мкКл/м}^2.$$

Знак палярызацыйнага зарада процілеглы знаку зарада на шарыку. 17.63.

$E_1 = 14,4 \text{ кВ/м; } E_2 = 8,9 \text{ кВ/м.}$  17.64.  $\sigma = \epsilon_0 \epsilon U/h = 1,5 \text{ мкКл/м}^2$ ;  $\sigma' = \epsilon_0 (\epsilon - 1)U/h = 1,5 \text{ мкКл/м}^2$ .

17.65.  $E_1 = Qr_1/(4\pi\epsilon_0\epsilon R^3) \approx 533 \text{ кВ/м; } E_2 =$

$= Q/(4\pi\epsilon_0\epsilon r_2^2) = 2,3 \text{ МВ/м. } D_1 = Qr_1/(4\pi R^3) = 23,6 \text{ мкКл/м}^2$ ;  $D_2 = Q/(4\pi r_2^2) =$

$= 19,5 \text{ мкКл/м}^2$ ;  $\varphi_1 = Q(R^2 - 2\epsilon R^2 - r_1^2)/(8\pi\epsilon_0\epsilon R^3) = 126,7 \text{ кВ; } \varphi_2 =$

$= Q/(4\pi\epsilon_0\epsilon r_2) \approx 90 \text{ кВ.}$  17.66. 1)  $D = E = 0$ ; 2)  $D = \rho(r_2^3 - R_1^3)/(3r_2^2) = 23 \text{ нКл/м}^2$ ;

$E = 523 \text{ В/м; } 3) D = \rho(R_2^3 - R_1^3)/[3(R_2 + l)^2] \approx 12,1 \text{ нКл/м}^2$ ;  $E = \rho(R_2^3 -$

$- R_1^3)/[3\epsilon_0\epsilon_2(R_2 + l)] \approx 550 \text{ В/м; } \Delta\varphi = [\rho/(3\epsilon_0\epsilon_1)](R_2^3 - 3R_1^2R_2 + 2R_1^3)/(2R_2) \approx$

$\approx 9,9 \text{ В.}$  17.67.  $Q'_1 = (Q_1 + Q_2)R_1/(R_1 + R_2) = 9,6 \text{ нКл; } Q'_2 = (Q_1 + Q_2) - Q'_1 =$

$= 21,5 \text{ нКл.}$  17.68.  $Q'_1 = (Q_1 + Q_2)R_1/(R_1 + R_2)$ ;  $Q'_2 = (Q_1 + Q_2)R_2/(R_1 + R_2)$ ;

$\varphi = (Q_1 + Q_2)/[4\pi\epsilon_0\epsilon(R_1 + R_2)]$ . 17.69.

$$E_1 = \frac{R_1\varphi_1}{(R_1 + l)^2} = 3,3 \text{ В/см;}$$

$$E_2 = \frac{R_1^2\varphi_1}{(R_1 + l)^2(R_1 + R_2)} = 1,1 \text{ В/м.}$$

17.70.  $U = (3/2) Q/C$ . 17.71.  $C = 167 \text{ пФ.}$  17.72.  $C = 75,4 \text{ пФ.}$  17.73.  $r \approx 6,4 \text{ см.}$

17.74.

$$U \leq \frac{C_1 + C_2}{C_2} U_1, \text{ калі } C_1 < C_2;$$

$$U \leq U_1 + U_2, \text{ калі } C_1 = C_2.$$

17.75.

$$\Delta\varphi = \frac{C_1\Delta\varphi_1 + C_2\Delta\varphi_2}{C_2 + C_1} = 36,7 \text{ В.}$$

17.76.  $U_2 = C_1 U_1 / (C_2 + C_1) = 12,5$  В. 17.77.  $C_2 = C_3 = (1/2) (C - Q_1/U) = 30$  мкФ;  $Q_2 = Q_3 = 7,5$  мКл. 17.78.

$$n = \frac{2dC}{\epsilon_0 \pi R^2} + 1 = 11 \text{ пласцін.}$$

17.79. Па 2 паслядоўна злучаных кандэнсатары ў 4 паралельна злучаных галінах. Усяго 8 кандэнсатараў. 17.80.  $\Delta U_{AB} = (C_1 E_1 - C_2 E_2) / (C_1 + C_2) = -1,3$  В.

17.81.  $C_{\text{агульн}} = 2C$ . 17.82.

$$Q_1 = C_1 \frac{C_3 E_2 - C_1 E_1}{C_1 + C_2}.$$

17.83.  $C = 2\epsilon_0 \epsilon S / [d(\epsilon + 1)]$ ;  $C = 2\epsilon_0 S / d$ . 17.84. Рознасць патэнцыялаў да ўнясення пласціны 900 В, пасля ўнясення — 675 В. 17.85. Да злучэння пласцін  $U_{ad} = E$ ;  $U_{ab} = U_{bc} = U_{cd} = E/3$ . Калі прыняць  $\varphi_a = 0$ , то  $\varphi_b = E/3$ ;  $\varphi_c = (2/3)E$ ;  $\varphi_d = E$ . Калі  $b$  і  $c$  злучаны, то  $\varphi_b = \varphi_c$  і  $E_{bc} = 0$ ;  $U_{ab} = U_{cd} = E/2$ . Тады напружанасць поля  $E_{ab} = E_{cd}$  узрасце. На пласцінах  $b$  і  $c$  зарада не будзе, а на  $a$  і  $d$  ён узрасце. 17.86. Ёмістасць сістэмы (рыс. 24)  $C_{\text{агульн}} = \epsilon_0 \epsilon S / [h + (d - h)\epsilon]$ . Напружанасць у сляях  $E_1 = U_1 / (d - h)$  і  $E_2 = U_2 / h$ . З умовы  $CU =$

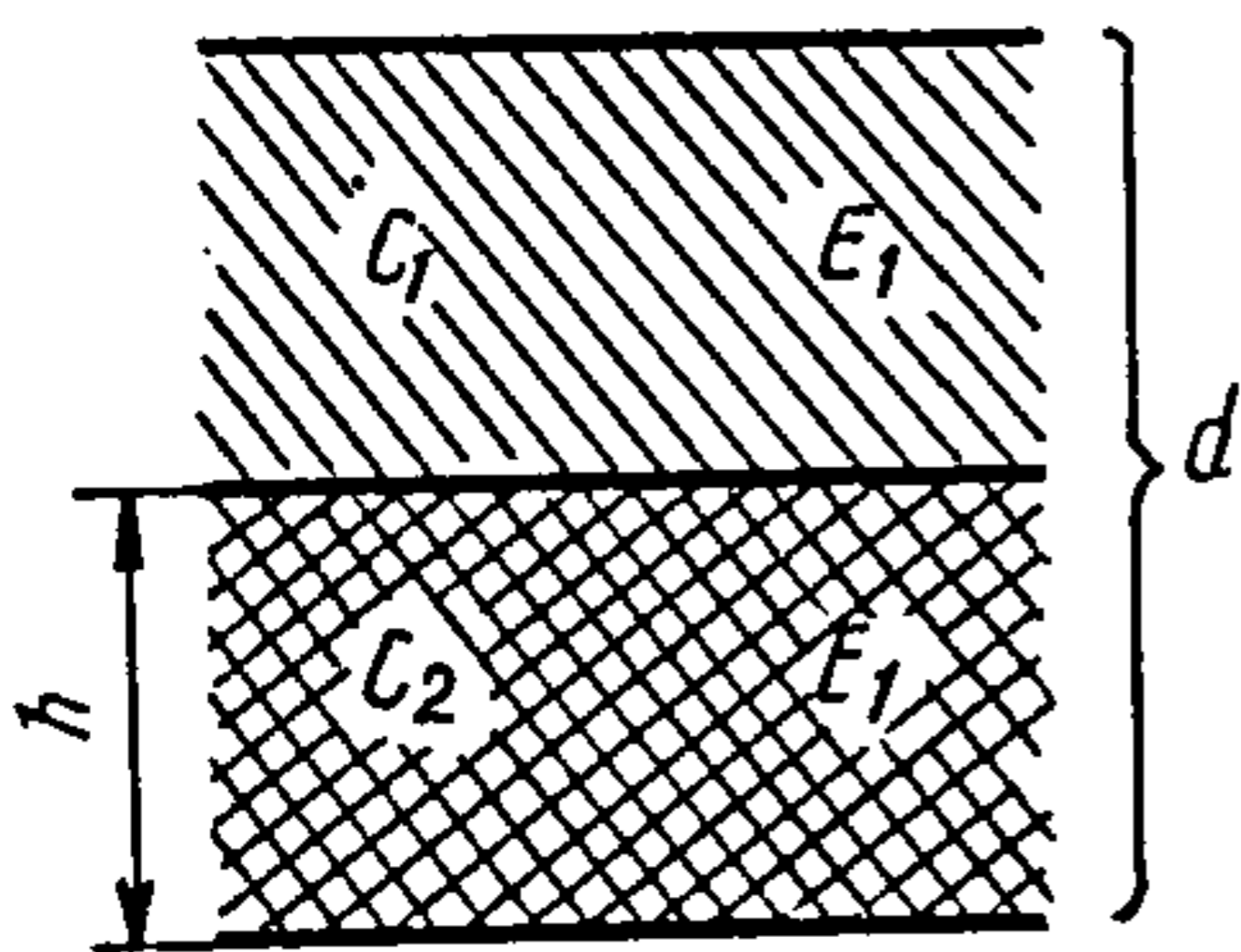


Рис. 24

$= C_1 U_1 = C_2 U_2$  знаходзім:  $E_1 = \epsilon U / [(d - h)\epsilon + h]$  і  $E_2 = U / [(d - h)\epsilon + h]$ . Да адключэння крыніцы напружання зарад

$$Q = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U}{(d - h)\epsilon + h}$$

і размеркаваны па паверхні са шчыльнасцю

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \epsilon U}{(d - h)\epsilon + h}.$$

Няхай напружанасць поля ў паветраным і дыэлектрычным сляях пасля адключэння кандэнсатара ад крыніцы току і ўнясення ў кандэнсатар дыэлектрычнай пласціны  $E_1' = \sigma / \epsilon_0$  і  $E_2' = \sigma / (\epsilon_0 \epsilon)$ . Лічачы поле аднародным і памер пласцін значна большым, чым адлегласць паміж імі, атрымаем:  $E_1' = U/d$  і  $E_2' = U / (\epsilon d)$ . 17.87.  $Q = Q(x/d)$ . 17.88.  $\Delta Q = (1/3)Q$ . 17.89.  $F = \epsilon_0 S U^2 / (2d^2) = 22,13$  мН. 17.90.

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt{m_1 / m_2 (2\sqrt{2} + 1)} = 87,5.$$



17.91.  $\varphi_1 = mg(h - R) / (4\pi\epsilon_0\varphi_0 r)$ , калі шар не перапоўніцца вадкасцю раней, чым зарадзіцца да знойдзенага гранічнага патэнцыялу;  $\varphi_2 = \varphi_0 R^2 / r^2$  — калі шар напоўніцца цалкам вадкасцю. 17.92.  $n = 2\pi\epsilon_0\epsilon m v_0^2 R / Q^2$  для выпадку  $Q_{\max} \gg Q$ . 17.93.

$$\omega = \frac{1}{4R} \sqrt{\frac{Q}{\pi\epsilon_0\epsilon m R} (4Q_1 - Q)}; \quad \frac{E_k}{E_p} = -\frac{1}{2}.$$

17.94.

$$v = \sqrt{\frac{2Q_2}{m} \left( \sqrt{\frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0 E}} - l \right) \left( \frac{1}{l} \sqrt{\frac{Q_1 E}{4\pi\epsilon_0}} - E \right)}.$$

17.95.

$$A = \frac{Q^2}{2} \frac{C_1 - C_2}{C_1 C_2}.$$

17.96.  $A = \epsilon_0 E^2 S h / [d(d - h)] = 8,9$  мкДж. 17.97.  $A = E^2 / 2(C_2 - C_1) \approx 4$  Дж.

17.98.

$$A = \frac{C_1 U_1^2}{2} \left( \frac{C_1}{C_2} - 1 \right) \approx 0,2 \text{ Дж}; \quad U_2 = \frac{C_1}{C_2} U_1 = 1,5 \text{ кВ}.$$

17.99.  $A = 2dEQ$ . 17.100.  $F = Q_2 / (32\pi^2\epsilon_0 R^4)$ . 17.101.

$$W = \frac{Q_2}{8\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = 20,3 \text{ мДж}.$$

17.102. Ёмістасць  $C$  у абодвух выпадках змяншаецца (павялічваецца); напружанне  $U$ : 1) павялічваецца (змяншаецца); 2)  $U = \text{const}$ ; энергія  $W$ : 1) павялічваецца (змяншаецца); 2) змяншаецца (павялічваецца). 17.103.

$$\Delta W = \frac{C_1 C_2}{2(C_1 + C_2)} (\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)^2 > 0.$$

17.104.

$$\Delta W = \frac{C_1 C_2 (C_1 - C_2)^2 U^2}{2(C_1 + C_2)^3} \approx 24 \text{ мДж, зменшыцца}.$$

17.105.  $F = 192$  фН;  $\omega = \epsilon_0 U^2 / (2d^2) \approx 16$  мДж/м<sup>3</sup>. 17.106.  $A = U^2 (\epsilon_0 S / d)^2 / 2 = 99,5$  мкДж. Да і пасля рассоўвання шчыльнасць энергіі  $\omega$  не змянілася і роўная  $\omega = \epsilon_0 (U/d)^2 / 2 \approx 25$  мДж/м<sup>3</sup>. 17.107.  $C = 17,7$  пФ;  $Q = 5,3$  нКл;  $\Delta U =$

$= 0,6 \text{ кВ}; W_1 = 0,8 \text{ мкДж}; W_2 = 2,4 \text{ мкДж}$ . 18.1.  $\langle v \rangle = AI / (N_A \rho Se) = 0,7 \text{ мкм/с}$ .  
 18.2.  $Q = (1/2) I \tau = 50 \text{ Кл}$ . 18.3.  $v = I / (Sne) \approx 1,3 \text{ мкм/с}$ . 18.4.  $I = 10 \text{ А}; E =$   
 $= 122 \text{ В}; R = 121,8 \text{ Ом}; I_{к.з} = 610 \text{ А}; U = 0$ . 18.5.  $I_{\text{парал}} = 0,96 \text{ А}; I_1 = 1,52 \text{ А}; I_2 =$   
 $= 2,48 \text{ А}; I_{\text{пасляд}} = 1,71 \text{ А}$ . 18.6.  $U = 1,5 \text{ В}$ . 18.7.  $\Delta R = R_{t_2} - R_{t_1} = \alpha \rho (l/S) (t_2 -$   
 $- t_1) \approx 18,5 \text{ мОм}$ . 18.8.  $t = 2294,5^\circ \text{ С}$ . 18.9.

$$\Delta U = U \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

18.10.  $r = 2R; R_{\text{агульн}} = 4R$ . 18.11.  $U = E/3 = 3 \text{ В}$ . 18.12. а)  $R_{\text{агульн}} = 0,5 \text{ Ом};$   
 б)  $R_{\text{агульн}} \approx 0,3 \text{ Ом}$ . 18.13. а)  $R_{AB} = 5R/11$ ; б)  $R_{AB} = 5R/6$ ; в)  $R_{AB} = 4R/5$ . 18.14.  
 а)  $R_{ad} = 0,6 \text{ Ом};$  б)  $R_{ac} = 2,0 \text{ Ом};$  в)  $R_{ad} = 1,3 \text{ Ом};$  г)  $R_{ab} = 1,0 \text{ Ом};$  д)  $R_{ac} = 1,4 \text{ Ом};$   
 е)  $R_{ac} = 1,8 \text{ Ом};$  ж)  $R_{ab} = 0,5 \text{ Ом}$ . 18.15.  $R_{\text{агульн}} = 2,7 R$ . 18.16.  $I = 3 \text{ А}$ . 18.17. У  
 10 разоў. Паралельна злучаныя рэзисты ўключыць паралельна прыбору.  
 18.18.  $E_1 R_3 (R_1 + R_2) = E_2 R_4 (R_1 + R_3)$ . 18.19.  $I_1 = 1,0 \text{ А}; I_2 = 0,8 \text{ А}; I_3 = 0,2 \text{ А}$ .  
 18.20.  $\Delta t = 10^{-3} R_2 \text{ С}$ . 18.21.  $\Delta Q = CER_3 / (R_3 + R_4) = 83 \text{ мкКл}$ . 18.22.  $Q =$   
 $= CUR_2 / (R_1 + R_2)$ . 18.23.  $R_1 = 18,8 \text{ Ом}; R_2 = 5,5 \text{ Ом}$ . 18.24.  $I = 2,5 \text{ А}$ . 18.25.  
 $U_{AB} = E; U_{AB} = 0$ . 18.26.  $I_{ab} = E / (7R)$ . 18.27.  $R = 8/225 = (R_0 + 2l\rho)$ . 18.28. Трэба  
 ўключыць гальванометр у тое плячо мосціка Уітстана, у якое звычайна  
 уключаецца шукаемае супраціўленне  $R_x$ , а ў дыяганаль мосціка замест галь-  
 ванометра паставіць ключ. 18.29.  $I_1 = I_2 = 27,0 \text{ мА}; I_3 = I_4 = 6,0 \text{ мА}$ . 18.30.

$$R_1 = \frac{R_2 [UR_4 - I(r(R_3 + R_4) + R_3 R_4)]}{UR_3 + I[r(R_3 + R_4) + R_2 R_4 + R_3 R_2 + R_3 R_4]}$$

18.31.  $R_1 / R_2 = 1/4$ . 18.32.  $I_1 = 0,4 \text{ А}; I_2 = 1,2 \text{ А}; I_3 = 1,6 \text{ А}$ . 18.33.  $I \approx 1,1 \text{ А}$ . 18.34.  
 $U_1 = UR_1 lx / (R_1 l^2 + Rlx - Rx^2)$ . 18.35.  $I_1 \approx 0,33 \text{ А}; I_2 = 0,66 \text{ А}; I_3 = 1,00 \text{ А}$ . 18.36.  
 $I = 0,45 \text{ мА}$ . 18.37.  $I = 75 \text{ мА}$ . 18.38.

$$E = \frac{I_4}{R_3 R_5} [R_1 (R_2 R_5 + R_3 R_5 + R_4 R_5 + R_2 R_4 +$$
 $+ R_3 R_4) + R_3 (R_2 R_4 + R_2 R_5 + R_1 R_5)]$

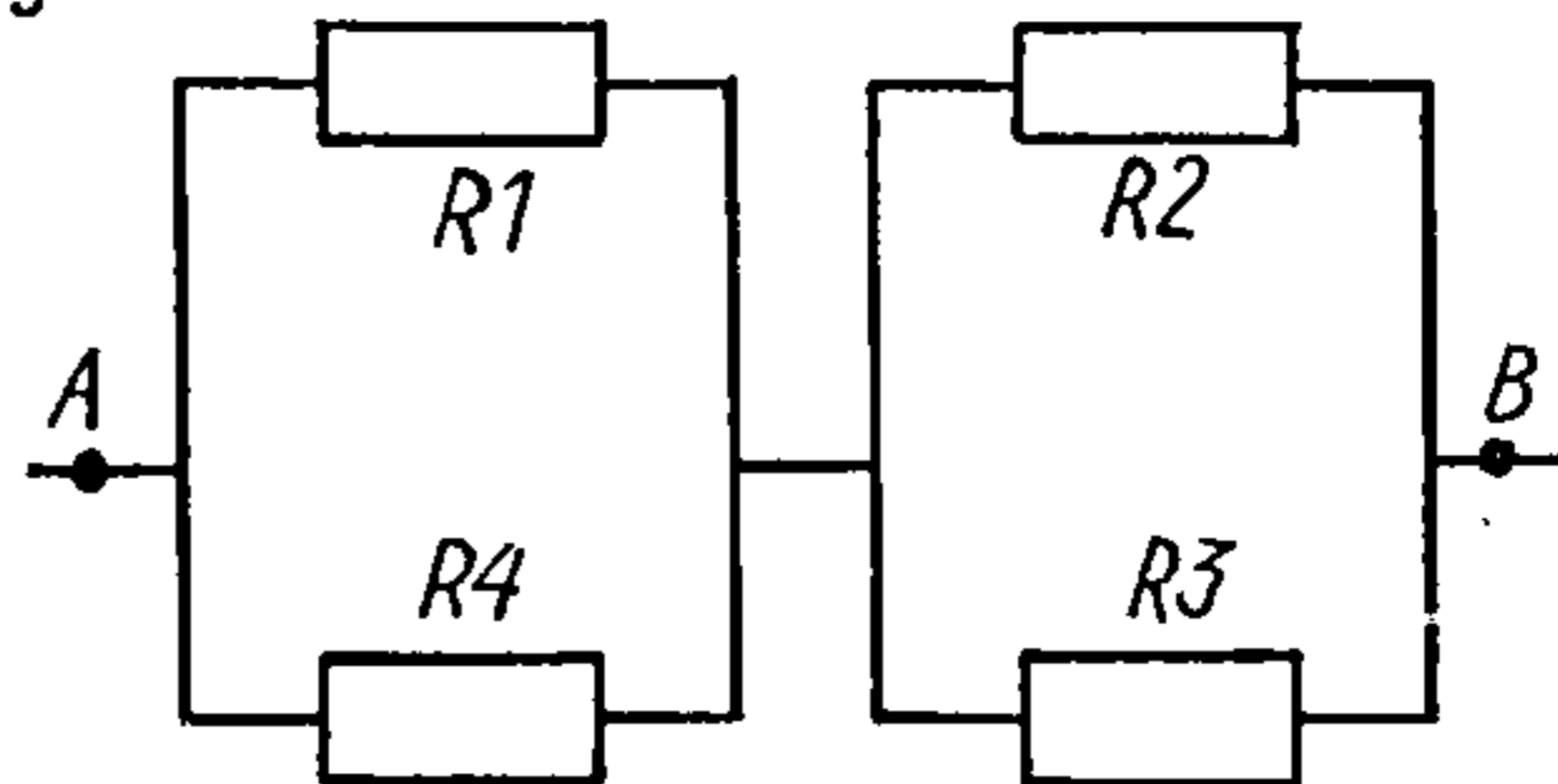
18.39.  $I_1 \approx 0,7 \text{ А}; I_2 = 4,1 \text{ А}; I_3 = 4,9 \text{ А}$ . 18.40.  $U_1 \approx 4,0 \text{ В}; U_2 = 0,8 \text{ В}; U_3 = 1,16 \text{ В}$ .  
 18.41.  $I_1 = 4,57 \text{ А}; I_2 = 16,86 \text{ А}; I_3 \approx 12,3 \text{ А}$ . 18.42.  $I_1 = I_2 = 0,44 \text{ А}; I_3 = 0,88 \text{ А};$   
 $I_4 = 2,75 \text{ А}; I_5 = 2,18 \text{ А}; I_6 = 1,45 \text{ А}; I_7 = 3,63 \text{ А}$ . 18.43. Ключ разамкнёны:  $I_1 =$   
 $= I_2 = 0,9 \text{ А}; I_3 = I_4 = 2,0 \text{ А}; I \approx 2,9 \text{ А}; R = 6,2 \text{ Ом}$ . Ключ замкнёны:  $I_1 = 0,7 \text{ А};$   
 $I_2 = 1,1 \text{ А}; I_3 \approx 2,3 \text{ А}; I_4 = 1,9 \text{ А}; I_k = 0,4 \text{ А}; I = 3,0 \text{ А}; R \approx 6,1 \text{ Ом}$ . 18.44.  $I_1 =$   
 $= 5,33 \text{ А}; I_2 = 4,34 \text{ А}; I_3 = 0,99 \text{ А}; P = 24,35 \text{ Вт}$ . 18.45.  $I_1 \approx 0,1 \text{ А}; I_2 \approx 42,0 \text{ А};$

$$I_3 \approx 60,0 \text{ A. 18.46. } I_1 = 10,0 \text{ A; } I_2 = I_3 = 5,0 \text{ A. 18.47.}$$

$$\text{a) } U = E - I_0 R_1 \frac{E_2 + I_0 R_2}{R_1 + R_2} \approx 27 \text{ В;}$$

$$\text{б) } U = R_4 \frac{E_1 - I_0 R_2}{R_2 + R_4} - R_1 \frac{E_1 - I_0 R_2}{R_1 + R_3} \approx 23 \text{ В.}$$

18.48. З падлікаў і графіка залежнасці магутнасці ад  $R$  на грузкі вынікае, што са спіраляў трэба скласці награвальнік супраціўленнем, як мага больш бліжкім да 20 Ом, г.зн. да  $r$ . Выкарыстаць толькі спіраль супраціўленнем 20 Ом нельга, таму што пры гэтым спажываемая ма-



Рыс. 25

гутнасць будзе  $P = (E/R + r)^2 R = 5 \text{ Вт}$ ,

што супярэчыць умове задачы, таму што кожная са спіраляў разлічана на магутнасць, не большую, чым 2 Вт. З усіх магчымых схем злучэння спіраляў найлепшая мае выгляд, паказаны на рыс. 25. 18.49. ККДз схемы а большы, чым схемы б. 18.50.  $R_0 = (R_2 t_1 - R_1 t_2) / (t_1 - t_2) = 0,1 \text{ кОм}$ . 18.51.  $S =$

$$= 410 \text{ мм}^2; U = 211 \text{ В; } \Delta P = 10 \%. 18.52. P_1 = 450 \text{ кВт; } \Delta P = 540 \text{ Вт; } P_2 = 3,96 \text{ кВт;}$$

$$\eta = 88 \%. 18.53. n = I(E - IR) / (2nrmg). 18.54. Q = Pt + cmQ + \lambda t, \text{ дзе } t \text{ —}$$

маса вады. 18.55.  $Q_1 / Q_2 = (1 + \alpha t_1) / (1 + \alpha t_2)$ . Пры ахалоджванні награвальніка вентылятарам вылучаецца большая колькасць цеплыні. 18.56.  $P =$

$$= 2,30 \text{ кВт; } l = U / (J \rho_{t_1}) \approx 30,0 \text{ м;}$$

$$d = \frac{4k(t_2 - t_1)}{J^2 \rho_{t_1} [1 + \alpha(t_2 - t_1)]} = 0,93 \text{ мм.}$$

18.57.  $\Delta l / l_0 = k_{\text{л}} I^2$ , дзе  $k_{\text{л}}$  — каэфіцыент прапарцыянальнасці;  $k_1 =$

$$= 4\alpha\rho / (\tau^2 d^2 k), \text{ дзе } k \text{ — каэфіцыент цеплааддачы. 18.58. } I_2 = I_1 (a_2 / a_1)^2 =$$

$$= 160 \text{ А. 18.59. } Q = (1/3) C E^2. 18.60. Q = (1/2) C (E - U_0)^2. 18.61.$$

$$Q = \frac{C[(E - U_0)^2 - (I_0 R)^2]}{2} + \frac{R}{R + r} \frac{C(U_0 - I_0 R)^2}{2}.$$

18.62.

$$S_{\text{св}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{уд. сапр. св}} \rho_{\text{шч. м}} S_{\text{м}}^2 c_{\text{м}} \Delta t_{\text{м}}}{\rho_{\text{уд. сапр. м}} \rho_{\text{шч. св}} (c_{\text{св}} \Delta t_{\text{св}} + \lambda_{\text{св}})}} = 3,76 \text{ мм}^2.$$



18.63.

$$\Delta t = \frac{\rho_{\text{уд. сапр. м}} \rho_{\text{шч. св}} S^2 (c_{\text{св}} \Delta t_1 + \lambda_{\text{св}})}{\rho_{\text{уд. сапр. св}} \rho_{\text{шч. м}} S_{\text{м}}^2 c_{\text{м}}} = 2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

18.64. 1)  $t_{\text{пасляд}} = t_1 + t_2 = 45$  мін; 2)  $t_{\text{парал}} = t_1 t_2 / (t_1 + t_2) = 10$  мін. 18.65.

$$I = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{k d^3 \Delta t}{\rho_1 (1 + \alpha \Delta t)}} = 0,5 \text{ А.}$$

$$l = \sqrt{\frac{U_2 d}{4 k \Delta t \rho_1 (1 + \alpha \Delta t)}} = 7,2 \text{ м; } P = 110 \text{ Вт.}$$

18.66.  $P = 605,0$  Вт;  $I = 2,75$  А;  $t = 17,3$  мін;  $C \approx 0,70$  кап. 18.67.  $U = 20,0$  Вт;  $I = 2,0$  А;  $r = 2,0$  Ом;  $P = 40,0$  Вт;  $\Delta P = 8,0$  Вт;  $P_{\text{поўн}} = 48,0$  Вт. 18.68.  $\eta = 58\%$ ;

$P_{\text{макс}} = E^2 I / [4(E - Ir)] = 6,45$  Вт;  $\eta = (E - E/2) / E = 50\%$ . 18.72.  $R = r$ ;  $I = E / (2r)$ ;  $P_{\text{макс}} = E^2 / (4r)$ . 19.1. Да.  $v_{\text{мін}} = 833$  км/с. 19.2.

$$d = \frac{I e^A / (kT)}{\pi l B \Gamma^2} = 4,3 \text{ мм.}$$

19.3.  $J_2 / J_1 = 2,6$ . 19.4.  $v = 987$  км/с. 19.5.  $v = 59,5$  Мм/с;  $W = 10,0$  кэВ. 19.6.

$n = 6,25 \cdot 10^{16}$  электронаў. 19.7.  $S = 1,2$  мА/В;  $R_i = 833$  Ом. 19.8.  $\mu_0 = 9$ . 19.9.

$\Delta I = 15$  мА;  $S = 5,0$  мА/В. 19.10.

$$n = \frac{I}{eS} \sqrt{\frac{2m}{eU}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}.$$

19.11.  $Q_{\text{макс}} = Q (T_1 - T_2) / (ET_1) = 5,50$  кКл. 19.12.  $I = \alpha (T_1 - T_2) / (R + R_g) = 80$  мкА. 19.13.  $t = 1015$  °С. 19.14.  $E = 25,0$  мВ. 19.15.  $R_g = 2,0$  кОм. 19.16.

$\Delta \varphi = 730$  мВ. 19.17.  $\Delta \varphi = 63$  мВ. 19.18.  $\Delta T = 8,7$  К;  $n = 89,5$  дзяленняў. 20.1.  $m \approx 24$  г. 20.2.  $t = 74$  с. 20.3.  $k = 1,12$  мкг/Кл (серабро). 20.4.  $Q = 15,00$  кКл.

20.5.  $t = 8,1$  гадз.;  $P = 2,8$  мВт. 20.6.  $t = 39$  мін. 20.7.  $Q = \pi d^3 \rho / (6k) = 4,5$  ГКл.

20.8.  $T = pVM / (kIRt) = 309,7$  К, дзе  $R$  — малярная газавая пастаянная. 20.9.  $k_{\text{Ag}} = 1,118$  мкг/Кл;  $k_{\text{Cu}} = 329,0$  мкг/Кл;  $k_{\text{Al}} = 93,20$  мкг/Кл;  $k_{\text{Ni}} = 304,0$  мкг/Кл.

20.10.  $\eta = 53,0\%$ . 20.11.  $m_{\text{Ni}} = 34$  г;  $m_{\text{Ag}} = 9,2$  г. 20.12. Не. Амперметр павінен

паказваць 4,3 А. 20.13.  $C = 10,3$  А·гадз. 20.14.  $m = 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг;  $e = 0,16$  аКл.

20.15.  $N = 1,20 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . 20.16.  $n = 5,0 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . 20.17.  $h = AIt / (F \rho S) \approx 77$  мкм. 20.18.  $t = m(R + r) / (kE) \approx 9$  гадз. 32 мін. 20.19.  $\sigma = Qn \alpha N_A (b_+ + b_-) / A = 1,45 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .

20.20.  $W = 134$  МДж. 20.21.  $\alpha = 40,0\%$ . 20.22.  $n =$

$= 99,5 \text{ кг/м}^3$ . 20.23.  $v = 2,74 \text{ Мм/с}$ . 20.24.  $v_+ = 12,65 \text{ м/с}$ ;  $v_- = 17,17 \text{ м/с}$ . 20.25.  $n = 3,9 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$ . 20.26.  $N \approx 17 \text{ мм}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . 20.27.  $v = 2,35 \text{ Мм/с}$ . 20.28.  $S = 57 \text{ мм}^2$ . 20.29.  $N = 5,0 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ . 20.30.  $\lambda = 31,3 \text{ мкм}$ . 20.31.  $U \geq dA / (e\lambda) \geq 161,25 \text{ МВ}$ . 20.32.  $A = 0,3 \text{ ГДж}$ ;  $E = 2,5 \text{ кВ/м}$ . 20.33.  $n = 73746 \text{ атамаў}$ . 21.1.  $B_1 = \mu_0 2I / (\pi d) = 240 \text{ мкТл}$ ;

$$B_2 = \mu_0 \frac{I}{2\pi} \frac{r_1 - r_2}{r_1 r_2} = 80 \text{ мкТл}.$$

21.2.  $I = B\pi a / [\mu_0 (2\sqrt{2} - 1)] = 34 \text{ А}$ . 21.3.  $B = \mu_0 I 2\sqrt{2} / (\pi a) = 230 \text{ мкТл}$ . 21.4.  $B = \mu_0 I / (4\pi a) = 15 \text{ мкТл}$ . 21.5.

$$B = \frac{\sqrt{2} \mu_0 I}{2\pi a} (\sin\alpha + \sin\alpha/2) = 24 \text{ мкТл}.$$

21.6.

$$I = \frac{\sqrt{3}}{3} \pi a B / \mu_0 = 2,9 \text{ А}.$$

21.7.  $B = \mu_0 \sqrt{I_1^2 + I_2^2} / (\pi d) = 20 \text{ мкТл}$ . 21.8.  $2,1 \text{ мкТл}$ . 21.9.  $6 \text{ А}$ . 21.10.  $I = 2\pi R B / [(\pi + 1)\mu_0] = 12 \text{ А}$ . 21.11.  $B = R^3 B_0 / (R^2 + d^2)^{3/2} = 5,4 \text{ мкТл}$ . 21.12.  $B = \mu_0 N I / \sqrt{l^2 + d^2} = 4,9 \text{ мТл}$ . 21.13.  $I = 2R B_0 \tan\alpha / n = 0,8 \text{ А}$ . 21.14.  $n = 2B_0 R \tan\alpha l / (NCE) = 100$ . 21.15.  $B = \mu_0 N I / (3R)$ . 21.16.  $B = (2/3)\mu_0 R \omega \sigma$ . 21.17.  $p_m = 2\pi (R^2 + d^2)^{3/2} B / \mu_0 = 78 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$ . 21.18.  $p_m = (\pi n / 4) d^2 I = 0,5 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ . 21.19.  $B_1 = \mu_0 I r_1 / (2\pi R^2) = 800 \text{ мкТл}$ ;  $B_2 = \mu_0 I / (2\pi r^2) = 200 \text{ мкТл}$ . 21.20.  $B_1 = 0$ ;  $B_2 = I\mu_0 / [2\pi (R+r)] = 0,2 \text{ мТл}$ . 21.21.  $B_1 = 50 \text{ мкТл}$ ;  $B_2 = 0$ . 21.22.  $v = 4\pi r^2 B / (\mu_0 l) = 160 \text{ км/с}$ . 21.23.  $B = \mu_0 l \sqrt{2lU/m} / (4\pi r^2) = 0,3 \text{ мТл}$ . 21.24.  $B = \mu_0 l \sqrt{\pi m \epsilon_0 R} \times (8\pi^2 m \epsilon_0 R^3)^{-1} = 12 \text{ Тл}$ . 21.25.  $B = \mu_0 \mu \omega \sigma R = 2,5 \text{ мкТл}$ . 21.26.  $250 \text{ мкВб}$ ;  $630$ . 21.27.  $2,5 \text{ А}$ ;  $320$ . 21.28.  $\mu = \pi d (\Phi_1 - \Phi_2) / (h_2 \Phi_1 - h_1 \Phi_2) = 310$ . 21.29.  $\Phi = N a^2 \mu_0 \mu I / (\pi d) = 1,3 \text{ мВб}$ . 21.30.  $B = 0$ . 21.31.  $I = S \rho g / (B \sin\alpha) = 7,0 \text{ А}$ , дзе  $\rho$  — шчыльнасць правадніка. 21.32.

$$F = \frac{\mu_0 N I_1 I_2 d}{\sqrt{R^2 + d^2}} = 420 \text{ мкН}.$$

21.33.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 a^2}{l(l+a)} = 5,3 \text{ мкН}.$$

21.34.  $P = IlBv \sin \alpha = 5$  Вт. 21.35.  $B = \mu mg / (lD) = 0,2$  Тл. 21.36.

$$B = \frac{1}{\mu_0 R} \sqrt{2mU/l} = 0,75 \text{ мТл.}$$

21.37.  $R = mv \sin \alpha / (lB) = 2,4$  мм;  $h = 2\pi mv \cos \alpha / (eB) = 2,6$  см. 21.38.  $R = \sqrt{2mE} / (lB) = 65$  см. 21.39.  $v = E / (B \sin \alpha) = 1$  Мм/с. 21.40. Папярочная рознасць патэнцыялаў, якая ўзнікае ў пласціне з токам пры змяшчэнні яе ў магнітнае поле,  $\Delta\varphi = (1/ne)IB(1/d)$ . Няхай  $Z$  — колькасць свабодных электронаў, якая прыпадае на адзін атам. Тады  $n = Zn_0$ , дзе  $n_0$  — колькасць атамаў у адзінцы аб'ёму. Маса аднаго атама  $\rho/n_0 = A/N$ , дзе  $\rho$  — шчыльнасць;  $A$  — атамная маса;  $N$  — пастаянная Авагадра. Тады  $n_0 = N\rho/A$ ,  $n = ZN\rho/A$ . Падставім значэнне  $n$  (лік Фарадэя  $F = eN$ ):

$$\Delta\varphi = \frac{A}{(F\rho Z)} \frac{IB}{d} = 4,5 \text{ мкВ.}$$

21.41.

$$\Delta\varphi = \frac{A}{F\rho Z} jBb = 16 \text{ мкВ.}$$

21.42.  $n = 2IB / (3l\Delta\varphi d) = 8,3 \cdot 10^{29} \text{ м}^{-3}$ . 21.43.

$$B_0 = \frac{\pi^2 mg^2}{3\rho_m T^2} - B = 20 \text{ мкТл.}$$

21.44.  $T_0 = \pi \sqrt{m / (3\rho_m B)} = 0,75$  с. 21.45.  $B_0 = \pi^2 ml^2 / (3\rho_m T^2) = 20$  мкТл. 21.46.

Магнітная індукцыя на восі саленоіда воддаль ад яго

$$B = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}.$$

Па ўмове задачы  $d \gg R$ , таму

$$B = \mu_0 \frac{n I R^2}{2d^3} = \mu_0 \frac{\pi n I R^2}{2\pi d^3} = \mu_0 \frac{(p_m)_1}{\pi d^3},$$

дзе  $(p_m)_1 = nIS$  — магнітны момант саленоіда. На магніт, які знаходзіцца ў неаднародным магнітным полі, дзейнічае сіла

$$F = (p_m)_2 \frac{\Delta B}{\Delta x} \cos \alpha = (p_m)_2 \frac{\Delta B}{\Delta x}$$

( $\cos \alpha = 1$ , таму што восі магніта і саленоіда накіраваны ўздоўж адной прамой). Няхай  $\Delta x = l$  — даўжыня магніта, тады

$$\Delta B = B_1 - B_2 = \mu_0 \left[ \frac{(p_m)_1}{\pi d^3} - \frac{(p_m)_1}{2\pi(d+l)^3} \right] = \frac{\mu_0 (p_m)_1}{2\pi d^3} \frac{3l}{d};$$



$$F = (p_m)_1 \frac{3\mu_0 l (p_m)_2}{2\pi d^4 l} = \frac{3\mu_0 (p_m)_1 (p_m)_2}{2\pi d^4} = 0,9 \text{ мкН.}$$

21.47.

$$F = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi d} l = 1 \text{ Н.}$$

21.48.

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{E^2 l_1}{(r + 2\rho l_2/s)^2 d} = 54 \text{ мН.}$$

21.49. 0,12 Н·м. 21.50.  $M = IBsN\sin\alpha = 0,25 \text{ Н·м}$ . 21.51.  $C = \pi r^4 Gd / (lBN\sin\alpha) = 0,23 \text{ мкА}$ . 21.52.  $I \approx 2\sqrt{\pi dh\sigma_{\text{пр}} / \mu_0} \approx 1,7 \text{ МА}$ . 22.1.  $A = BIl_s = 0,05 \text{ Дж}$ . 22.2.  $A = \pi R^2 IB\cos\alpha = 0,31 \text{ Дж}$ . 22.3.  $\Delta\varphi = B_0 lvs\sin\alpha = 0,48 \text{ мВ}$ . 22.4.  $\Delta\varphi = \pi nR^2 B = 1 \text{ мВ}$ . 22.5. 1,5 мВ. 22.6.  $B = 2U / (\omega l^2) = 0,2 \text{ Тл}$ . 22.7.  $B = (R_1 + R_2) / (2nS) = 0,18 \text{ Тл}$ . 22.8.

$$l = Q \frac{2\pi BSR^2}{(2\pi\rho R + r_{\text{уп}}S)C_0} = 1 \text{ м.}$$

22.9. 0,4 Гн. 22.10.  $L = \pi R^2 NB / I = 1,6 \text{ мГн}$ . 22.11.  $L = SBN / I = 1 \text{ Гн}$ . 22.12.  $L = \mu_0 \mu l_1^2 / (4\pi l_2) = 40 \text{ мГн}$ . 22.13. 0,2 Гн. 22.14. 8 мГн. 22.15. 2 мГн. 22.16.

$$L_{12} = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

22.17. 63 В. 22.18.  $E(t) = 0,06e^{-2t}$ . 22.19.

$$l = \frac{\pi\mu_0 \mu N^2 d^2}{4Rt} \ln \frac{E}{E - IR} = 0,57 \text{ м.}$$

22.20.  $W = \pi\mu_0 N^2 R^2 I^2 / (2l) = 10 \text{ мДж}$ . 22.21.  $t = \mu_0 nRS / (2\rho) = 0,36 \text{ мс}$ . 22.22.

$$W = \frac{LI^2}{2} e^{(2R/L)t} = 0,23 \text{ Дж.}$$

22.23.  $\mu \approx B(\pi d - b) / (NI\mu_0 - bB) = 2,5 \cdot 10^3$ . 22.24.  $W = \pi RSBH = 0,6 \text{ Дж}$ , дзе  $H = (N/2\pi R)I = 530 \text{ А/м}$ ;  $B = 1,2 \text{ Тл}$ . 22.25. Не. 22.26.  $v = 16\rho Dg / (d^2 B_0^2 \alpha^2)$ , дзе  $\rho$  і  $D$  — удзельнае супраціўленне і шчыльнасць рэчыва кольца. 23.1.

$$I_{\text{эф}} = \frac{\pi\sqrt{2}}{4} I_{\text{ср}} = 2,2 \text{ А.}$$

23.2. 0,4 А; 0,2 А. 23.3. Прибор магнітаелектрычнай сістэмы пакажа  $I_1 = I_m / \pi = 1,6$  А, а прибор цеплавой сістэмы  $I_2 = I_m / \sqrt{2} = 2,5$  А. 23.4. 20 мВ; 14 мВ. 23.5. 32 мкФ. 23.6.

$$L = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{(U_2/I_2)^2 - (U_1/I_1)^2} = 0,19 \text{ Гн.}$$

23.7. 1,2 А; 50 Гц; 5,5 кВ. 23.8.  $L = 0,02$  Гн. 23.9.  $\Delta t_1 = 3,3$  мс;  $\Delta t_2 = 6,6$  мс.

23.10. 32 Ом. 23.11. 260 мА; 0,18 А;  $76^\circ 49'$ ; 5,1 Вт. 23.12. 0,8 А; 93 Вт;  $13^\circ 15'$ . 23.13. 25 мГн; 90 м;  $41^\circ 24'$ . 23.14. 0,35 А; 12 мВт. 23.15.

$$n = \sqrt{\frac{3(12L - CR^2)}{4L - 3CR^2}} = 3,1 \text{ раза.}$$

23.16.

$$L = \frac{\nu \sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi(\nu_p^2 - \nu^2)} = 10 \text{ мГн.}$$

23.17.  $t = (\pi/4)\sqrt{LC} = 39$  мкс. 23.18.  $C = LI^2/U^2 = 200$  пФ. 23.19.  $R < 2\sqrt{L/C} = 100$  Ом. 23.20.

$$\nu = \frac{1}{2\pi RN} \sqrt{\frac{l}{\pi\mu_0 C}} = 3,6 \text{ кГц.}$$

23.21.  $Q = 2\pi R \sqrt{C/(4L - C^2)} = 0,14$ . 23.22.  $R = (2L/t) \ln n = 28$  Ом. 23.23.  $\nu = I_m / (2\pi C U_m) = 160$  Гц. 23.24.  $E = QI_m^2 t \sqrt{L/C} / (2\pi) = 86$  мДж. 23.25. 1,5 км.

23.26.  $1,1 \cdot 10^8$  м/с. 23.27.  $\nu = C / (2lV\epsilon\mu) = 59$  МГц. 23.28.

$$U_2^1 = \frac{kU_1}{\sqrt{(\mu_1/\mu_2)^2 [(kU_1/U_2)^2 - 1]}} = 20 \text{ В.}$$

## ОПТЫКА

24.1. 2 м. 24.2.  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м. 24.3.

$$N = \frac{4ab}{a+b} \frac{(n-1)^2 \varphi^2}{\lambda}$$

24.4. 644 мкм. 24.5.

$$\Delta x = \lambda \frac{L + r \cos \alpha}{2r \sin \alpha} = 48,2 \cdot 10^{-3} \text{ мм;}$$

$$\Delta s = \frac{\lambda}{4 \sin 2\alpha} = 44 \text{ мкм;}$$

24.6.  $h = \lambda b / (2l \sin \alpha)$ ,  $h$  — адлегласць паміж першымі інтэрферэнтнымі

мінімумамі;  $l$  — адлегласць няўнага відарыса ад крыніцы;  $\lambda$  — даўжыня хвалі святла. Такім чынам, чым менш  $\alpha$ , тым больш  $h$ . 24.7.  $\alpha = 10''$ . 24.8. Крыніцы святла  $S_1$  і  $S_2$  — кагерэнтныя (рыс. 26). Рознасць ходу  $\Delta_1 = l_2 - l_1 + \lambda/2$ ;  $l_2 = \sqrt{l_1^2 + H^2}$ ;  $l_2 - l_1 = l_1 \sqrt{1 + (H/l_1)^2} - l_1 = l_1 [\sqrt{1 + (H/l_1)^2} - 1]$ ;  $H/l_1 \ll 1$ . Вядома, што  $\sqrt{1 - a} \approx 1 + (1/2)a$ . Пры  $a \ll 1$   $l_2 - l_1 \approx l_1 [1 + (1/2)(H/l_1)^2 - 1] = H^2 / (2l)$ . Адсюль вынікае, што  $\Delta_1 = H^2 / (2l) + \lambda/2$ , але  $\Delta_1 = m_1 \lambda / 2$ , тады  $H^2 / (2l) + \lambda/2 = m_1 (\lambda/2)$ . Вядома, што  $H = 2h$ , тады

$$m_1 = \frac{H^2 / (2l) + \lambda/2}{\lambda/2} = \frac{4h^2}{2l} + 1 = 33$$

( $m_1$  — няцотнае, значыць, у пункце А назіраецца аслабленне святла). Калі паставім шкляную пласцінку, змяняецца аптычная рознасць ходу:  $\Delta_2 = l_2 - l_1' + \lambda/2$ , дзе  $l_1' = (l_1 - d) + nd$ ;  $d$  — таўшчыня пласцінкі;  $n$  — яе паказчык праламлення. Тады  $\Delta_2 = l_2 - [(l_1 - d) + nd] + \lambda/2 = l_2 - [l_1 + (n - 1)d] + \lambda/2$ ;  $\Delta_2 = \Delta_1 - (n - 1)d$ ;

$$m_2 = \frac{\Delta_2}{\lambda} = \frac{\Delta_1 - (n - 1)d}{\lambda/2} = m_1 - 2 \frac{d(n - 1)}{\lambda} = 20.$$

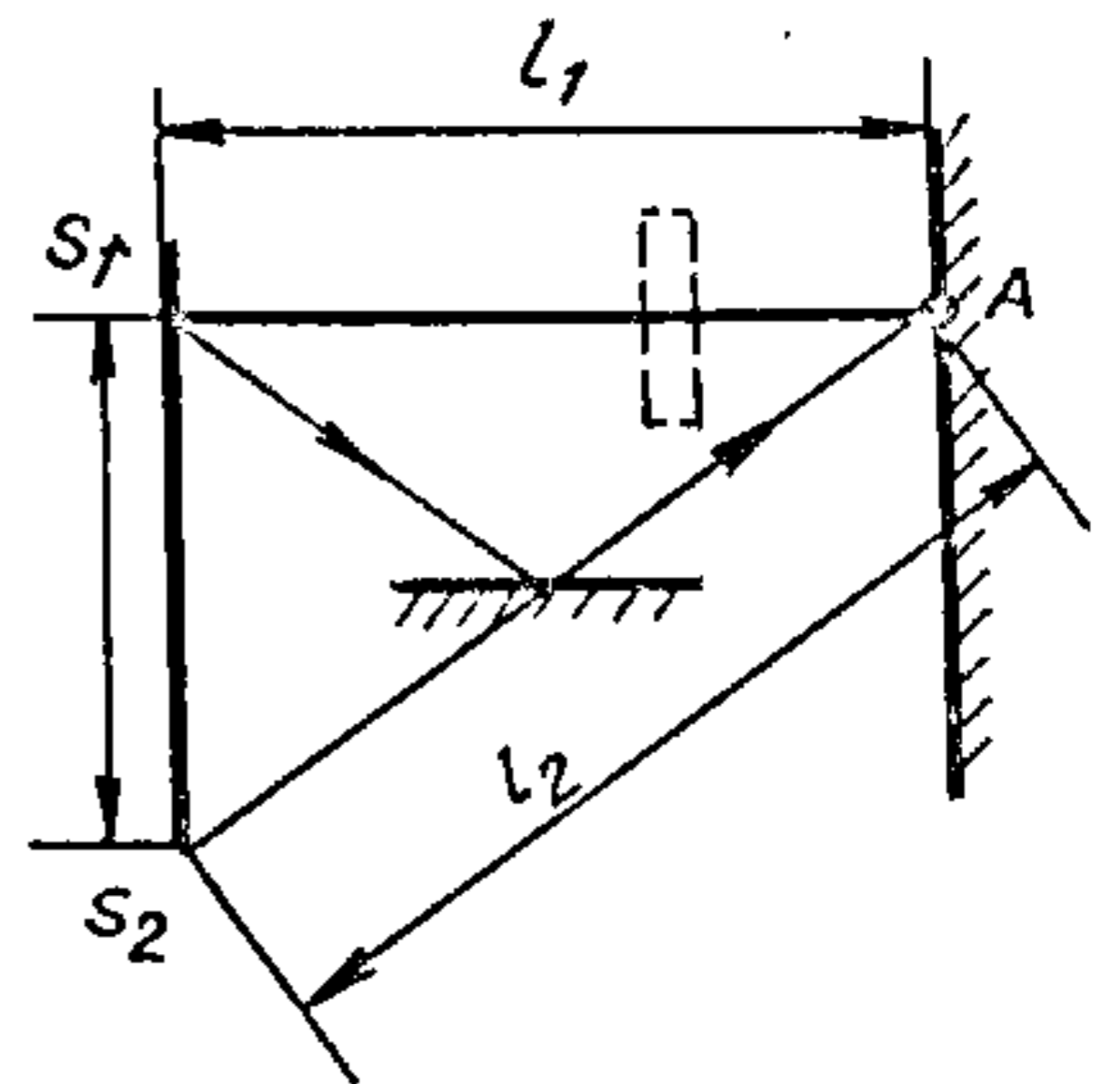
У пункце А будзе ўзмацненне святла. 24.9.

$$\lambda = \frac{\Delta x}{L} \frac{2\Delta h}{\eta - 1} = 0,6 \text{ мкм.}$$

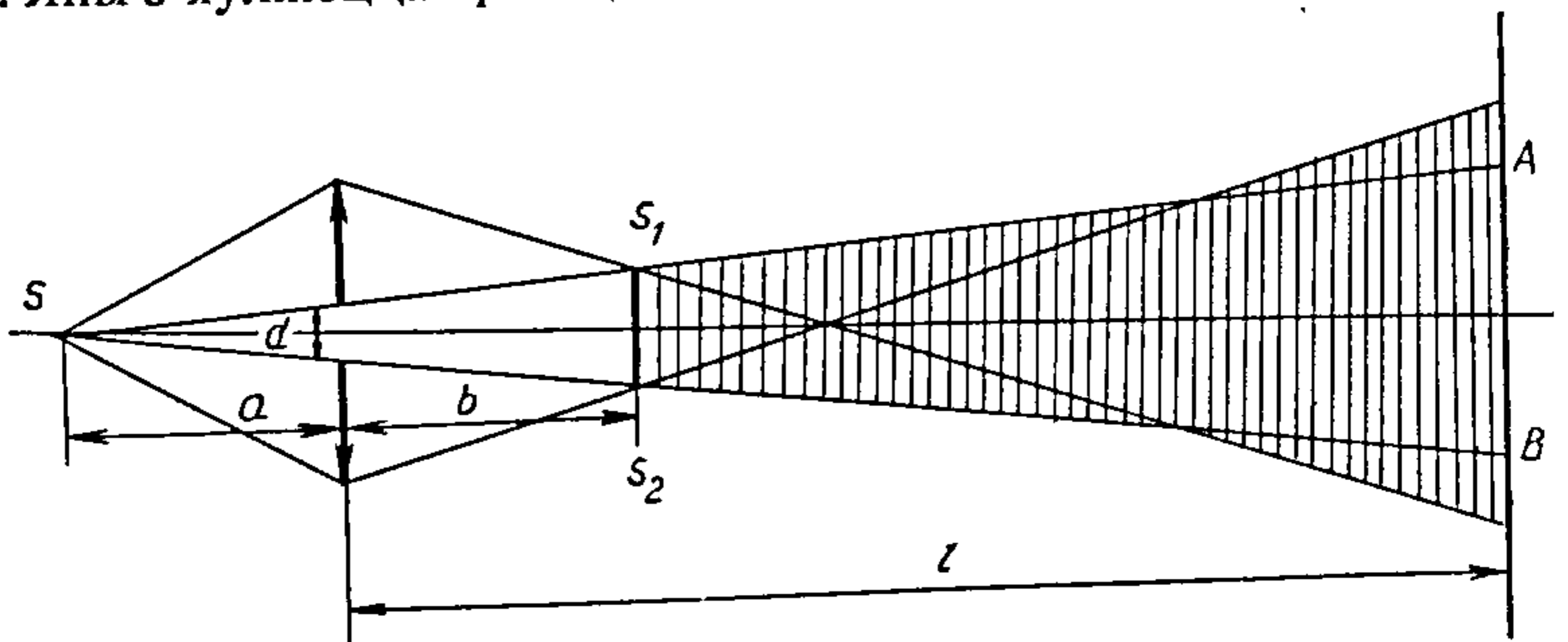
24.10. Палосы змесцяцца ў бок перакрытай шчыліны на адлегласць

$$\Delta x = \frac{hl(n - 1)}{d} = 2,0 \text{ мм.}$$

24.11. Ад кожнай паловы лінзы прамяні будуць збірацца ў пунктах  $S_1$  і  $S_2$  (рыс. 27). Яны з'яўляюцца крыніцамі кагерэнтных прамянёў  $\Delta x = 0,12$  см.



Рыс. 26



Рыс. 27



24.12.

$$l < l_0 = \frac{(D - d)aF}{(D - d)(a - F) + da} = 1,125 \text{ м.}$$

24.13.  $d = m\lambda / (n - 1) = 72 \text{ мкм.}$  24.14.  $d < 1 / (4n) = 100 \text{ нм.}$  24.15.  $0,517 \text{ мкм.}$

Плёнка будзе зялёная. 24.16.  $107 \text{ нм.}$  24.17.  $b_{\min} = k_2 \lambda_2 / (2\sqrt{n^2 - \sin^2 i})$ , дзе

$b$  — таўшчыня плёнкі;  $i$  — вугал падзення. 24.18.  $109,218 \dots (2k + 1) 109 \text{ мкм.}$

24.19.  $h_{\max} = 1,7 \text{ мкм; } h_{\min} = 1,6 \text{ мкм.}$  24.20.  $2,2 \text{ мм.}$  24.21.  $20 \text{ ''.}$  24.22.  $54 \text{ па-}$

ласы. 24.23.  $1,35.$  24.26.  $1,37 \text{ мкм.}$  24.27.  $2 \text{ мм.}$  24.28.

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda}{1/R_1 + 1/R_2}}.$$

24.29.

$$F = \frac{r_1^2 r_2^2}{r_1^2 + r_2^2} \frac{1}{(n - 1)m\lambda} = 54 \text{ см.}$$

24.30.  $0,39 \text{ мм.}$  24.31.  $h = \sqrt{R\lambda k}$ , дзе  $h$  — адлегласць паміж суседнімі палосамі.

Інтэрферэнцыйныя палосы — прамыя, паралельныя ўтвараючай цыліндра.

24.32. Калі кантакту няма,  $r_1^2 / R + 2d = 5\lambda$ . Пры выдаленні пылу  $r_2^2 / R = 5\lambda$ .

У выніку  $d = (r_2^2 - r_1^2) / (2R) = 1,8 \text{ мкм.}$  24.33.  $n = 1,36.$  24.34.  $n' = n + N\lambda / l =$

$= 1,000377$ , дзе  $n$  — паказчык праламлення паветра:  $n = 1,000277.$  24.35.  $n =$

$= \sqrt{n} = 1,33.$  24.36. Каля  $10^{-4} \Phi_0$  для жоўтай вобласці. Каля  $3 \cdot 10^{-2} \Phi_0$  для

фіялетавай вобласці. 24.37.  $\approx 5 \cdot 10^8.$  25.1.  $150\lambda.$  25.2.  $b = ar^2 / (m\lambda a - r^2) = 1 \text{ м.}$

25.3.  $r_{12} = 3r_4^2$ ;  $r_{12} = 3\sqrt{3} = 5,2 \text{ мм.}$  25.4.  $\sin\varphi = \sin\alpha \pm m\lambda / b.$  25.5. Калі шырмы

няма, амплітуда ваганняў у цэнтры экрана  $A = A_1 / 2$ , дзе  $A_1$  — амплітуда

ваганняў ад першай зоны Фрэнеля ў цэнтры экрана. Калі адчынена  $k$  зон

Фрэнеля, амплітуда ў цэнтры экрана  $A = A_1 / 2 \pm A_k / 2$ , «+» — пры няцотным

ліку зон, «-» — пры цотным. Калі радыус шырмы адпавядае умове

$$\frac{d}{2} = \sqrt{\frac{ab\lambda}{a + b}} k,$$

дзе  $k$  — цэлы няцотны лік, асветленасць у цэнтры павялічыцца. Калі  $k$  — цотны лік, асветленасць паменшыцца. Разлік дае

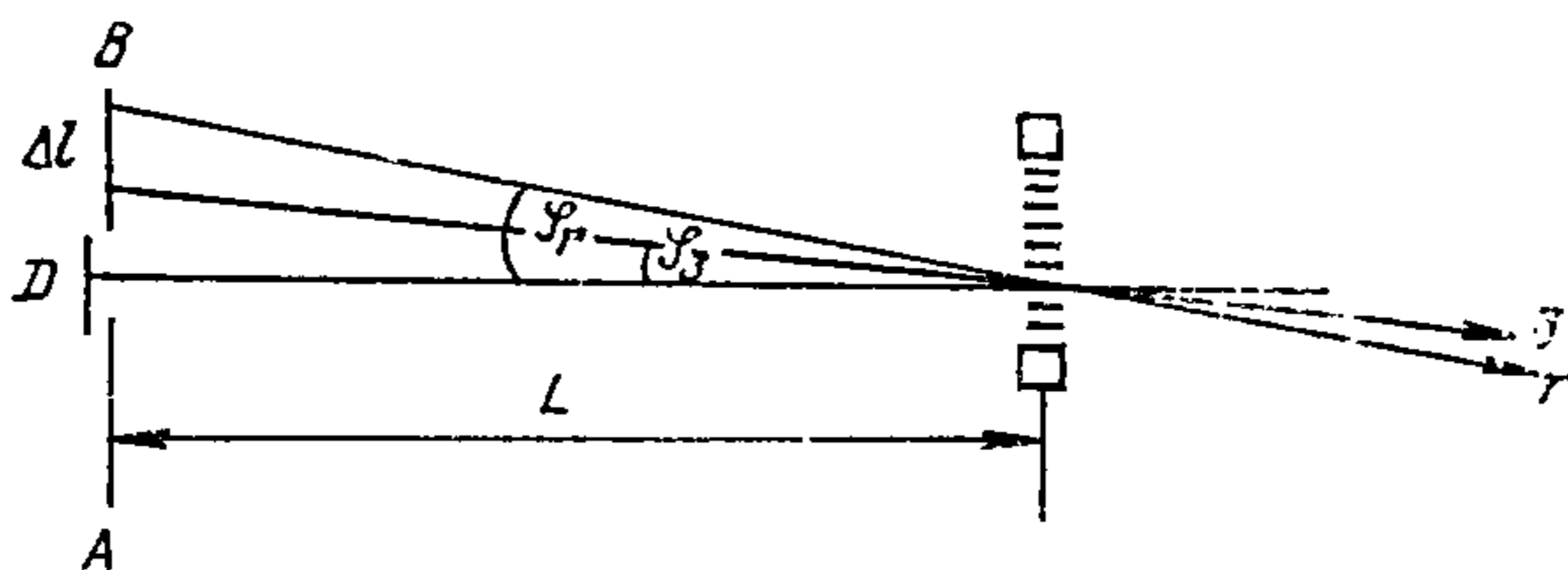
$$\frac{d^2}{4} = \frac{ab\lambda}{a + b} k; \quad k = \frac{d^2(a + b)}{4ab\lambda} \approx 3.$$

Асветленасць цэнтра павялічыцца, калі будзе стаяць шырма. 25.6. Калі

дыфрагма знаходзіцца пасярэдзіне паміж пунктамі  $A$  і  $B$ , то ў адтуліну

радыусам  $1 \text{ мм}$  можна упісаць  $k = 4$  зоны Фрэнеля ( $k = 2r^2 a / (\lambda a^2) = 4$ ). Тады

у пункце  $B$  будзе гашэнне. Калі дыяфрагма знаходзіцца на адлегласці 50 см ад  $A$ , то  $k_1 \approx 5,3$  зон Фрэнэля. Калі адлегласць ад дыяфрагмы да пункта  $A$  зрабіць роўнай 150 см, а да пункта  $B$  — 50 см, то колькасць зон Фрэнэля будзе той жа. Такім чынам, пры перамяшчэнні гашэнне будзе адзін раз: калі дыяфрагма знаходзіцца пасярэдзіне. 25.7.  $r = 4\lambda / (Da) = 4$  мм. 25.8.  $\lambda = (a + b) (r_2^2 - r_1^2) / (2ab) = 0,6$  мкм. 25.9. 0,7 мкм. 25.10.  $k_{\max} \leq 1/\sin\varphi$ . 25.11. Злева — пяты, справа — другі. 25.12. Інтэнсіўнасць  $m$ -га максімуму роўная нулю пры  $m = nk = (d/b)k$ . 25.13.  $72^\circ 45'$ . 25.14. 3 ўмовы дыфракцыйнага максімуму  $\sin\varphi'_{\text{зял}} = \lambda_{\text{зял}} / c$ ;  $\sin\varphi'_{\text{чырв}} = \lambda_{\text{чырв}} / c$ , дзе  $c$  — перыяд рашоткі;  $\Delta l =$



Рыс. 28

$= Db - Da$  (рыс. 28);  $Db = L \operatorname{tg}\varphi'_{\text{чырв}}$ ;  $Da = L \operatorname{tg}\varphi'_{\text{зял}}$ ;  $\Delta l$  — змяшчэнне:  $\Delta l = L(\operatorname{tg}\varphi'_{\text{чырв}} - \operatorname{tg}\varphi'_{\text{зял}})$ ; вуглы  $\varphi'_{\text{чырв}}$  і  $\varphi'_{\text{зял}}$  — малыя, таму  $\Delta l = L(\sin\varphi'_{\text{чырв}} - \sin\varphi'_{\text{зял}})$ . Тады:

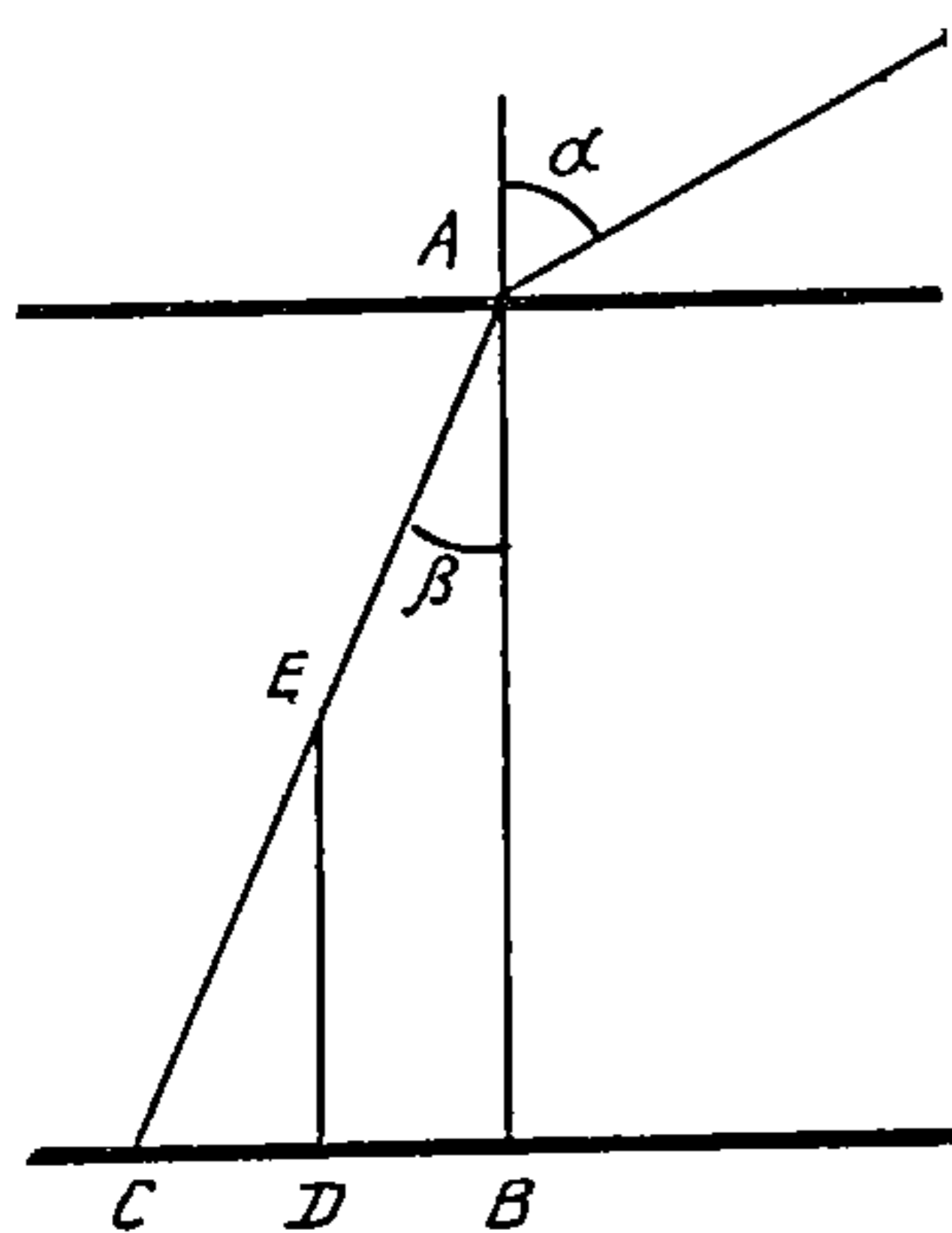
$$\Delta l = L \left( \frac{\lambda_{\text{чырв}}}{c} - \frac{\lambda_{\text{зял}}}{c} \right) = \frac{L}{c} (\lambda_{\text{чырв}} - \lambda_{\text{зял}}),$$

$$c = 1/N_0; \Delta l = LN_0 (\lambda_{\text{чырв}} - \lambda_{\text{зял}}) = 24 \text{ мм.}$$

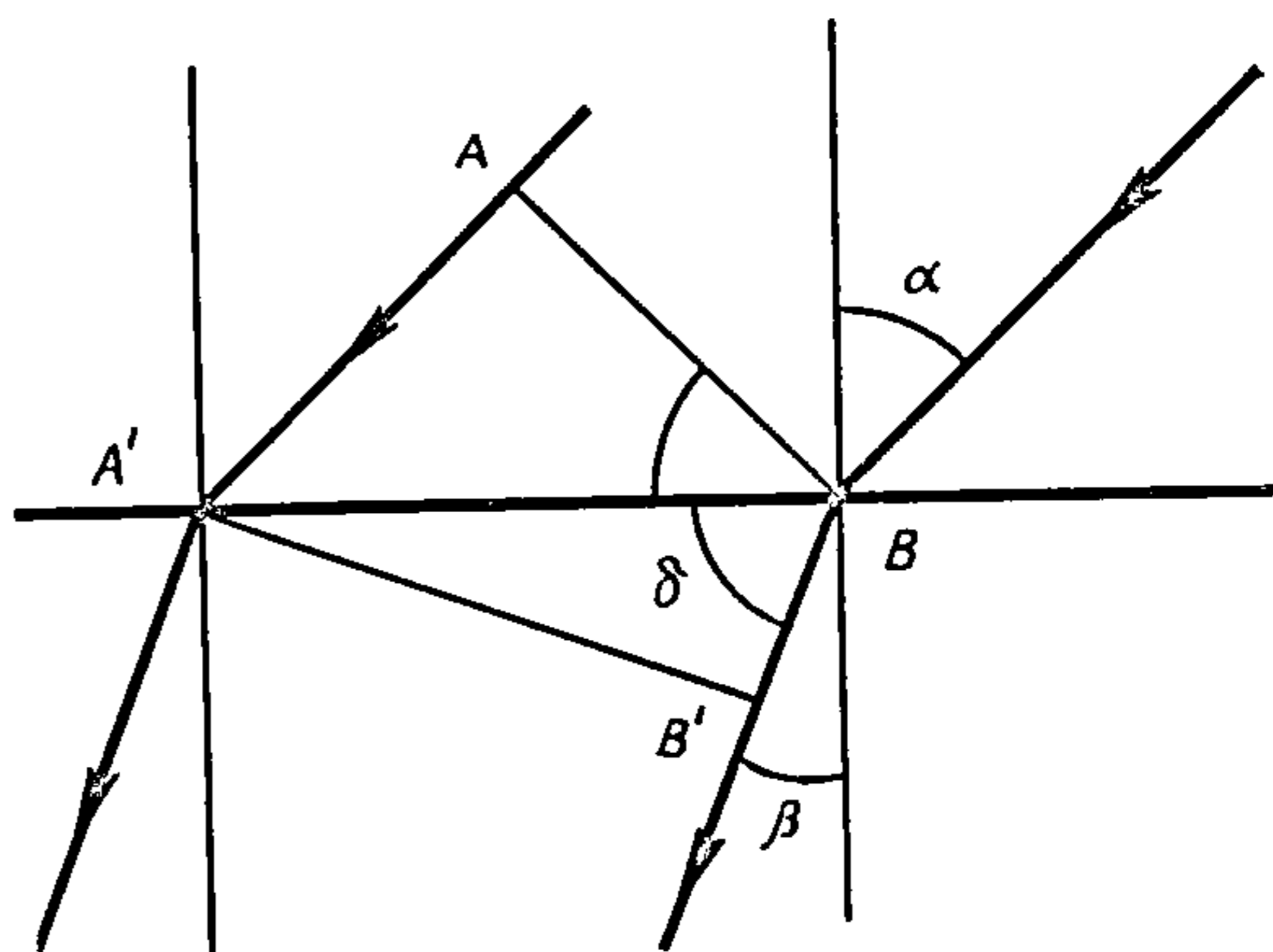
25.15.  $11^\circ 50'$ ;  $24^\circ 12'$ ;  $37^\circ 57'$ ;  $55^\circ 04'$ . 25.16. 0,26 мкм. 25.18. 0,5 мкм. 25.19. 466,7 нм. 25.20. Не будуць. Спектры розных парадкаў будуць дакранацца пры ўмове:  $k\lambda_2 = (k+1)\lambda_1$ ;  $k = \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) = 5$ . У выніку часткова перакрывацца могуць толькі спектры 6-га і больш высокіх парадкаў. Да дзеная рашотка дае ў гэтым выпадку толькі спектр 4-га парадку. 25.21.  $c = m\Delta\lambda / \lambda = 2,5$  мкм,  $l$  — шырыня рашоткі. 25.22.  $m = 3$ . 25.23.  $d = 5,15$  мкм;  $l = 2,57$  мм. 25.25.  $0,72 \cdot 10^{-6}$  м. 25.26. 50 Пм. 25.27. 1:4. 25.28.  $\partial\varphi / (\partial\lambda)$ , 1,15 рад/мкм. 25.29. 26 м/мкм. 25.30.  $D = 6$  см. 25.31.  $10^{-6}$  рад. 25.32.  $3,87 \cdot 10^6$ . 25.33.  $R = 140,8$  м. 25.34.  $U = hc / (e\lambda) = hc / (2d \sin\varphi) = 45$  кВ. 25.35. 293 Пм. 25.36. 290 Пм. 25.37.  $3^\circ$ . 25.38. Вызначым пастаянную рашоткі  $d$ . Аб'ём каменнай солі ў колькасці аднаго моля  $V_0 = M/\rho$ . У аб'ёме  $V_0$  маецца  $2N_A$  іонаў. Тады аб'ём, які прыпадае на адзін іон,  $V = M / (2\rho N_A)$ . Пастаянная рашоткі знойдзецца пры ўмове  $d = \sqrt[3]{V} = \sqrt{M} / (2\rho N_A)$ ;  $k\lambda = 2d \sin\varphi$ .  $\lambda =$

$= (2\sin\varphi)^3 \sqrt{M/(2\rho N_A)} / k = 26 \cdot 10^{-12}$  м. 26.1. 27,5. 26.3.  $\alpha = 120^\circ$ . 26.4. Вугал паміж люстэркамі павінен быць  $90^\circ$ . 26.5. Люстэрка ўвагнутае. 26.7.  $F = 4$  см. 26.8.  $d = 30$  см;  $d' = 10$  см. 26.9. Аддаліцца ад люстэрка на 5 см. 26.10. 45 см. 26.11.  $F = -30$  см. 26.12. Відарыс, атрыманы пасля адбіцця прамянёў ад абодвух люстэркаў, супадае з крыніцай. 26.13.  $R = ak/(k-1) = 0,6$ , дзе  $k$  — вуглавое павелічэнне. Калі  $R/2 > a$ , відарыс павелічэння ўяўны. 26.14. Па формуле сферычнага люстэрка  $1/d + 1/f = 2/R$  радыус  $r$  акружнасці, па якой рухаецца крыніца, і радыус  $r'$  акружнасці, па якой рухаецца відарыс, звязаны суадносінай  $r/r' = d/f$ . У выніку  $r' = rf/d = rR/(2d - R)$ . Цэнт-раімклівае паскарэнне  $a'$ , з якім рухаецца відарыс,

$$a' = \omega^2 r' = \left(\frac{v}{r}\right)^2 \frac{rR}{2d - R} = \frac{v^2 R}{r(2d - R)} = 4,5 \text{ м/с}^2.$$



Рыс. 29



Рыс. 30

26.15. На рыс. 29  $DC$  — цень ад  $AD$ .  $DC = ED \operatorname{tg}\beta$ ;  $\sin\alpha/\sin\beta = n_b$ ;  $\sin\beta = \sin\alpha/n_b$ ;  $\sin\beta = 0,5/1,33 = 0,38$ ;  $\beta = 22^\circ 30'$ ;  $DC = ED \operatorname{tg}22^\circ 30' = 38$  см. 26.16.

$$h = \frac{\Delta l}{\operatorname{tg}\beta_{\text{ч}} - \operatorname{tg}\beta_{\text{ф}}} = 23 \text{ мм},$$

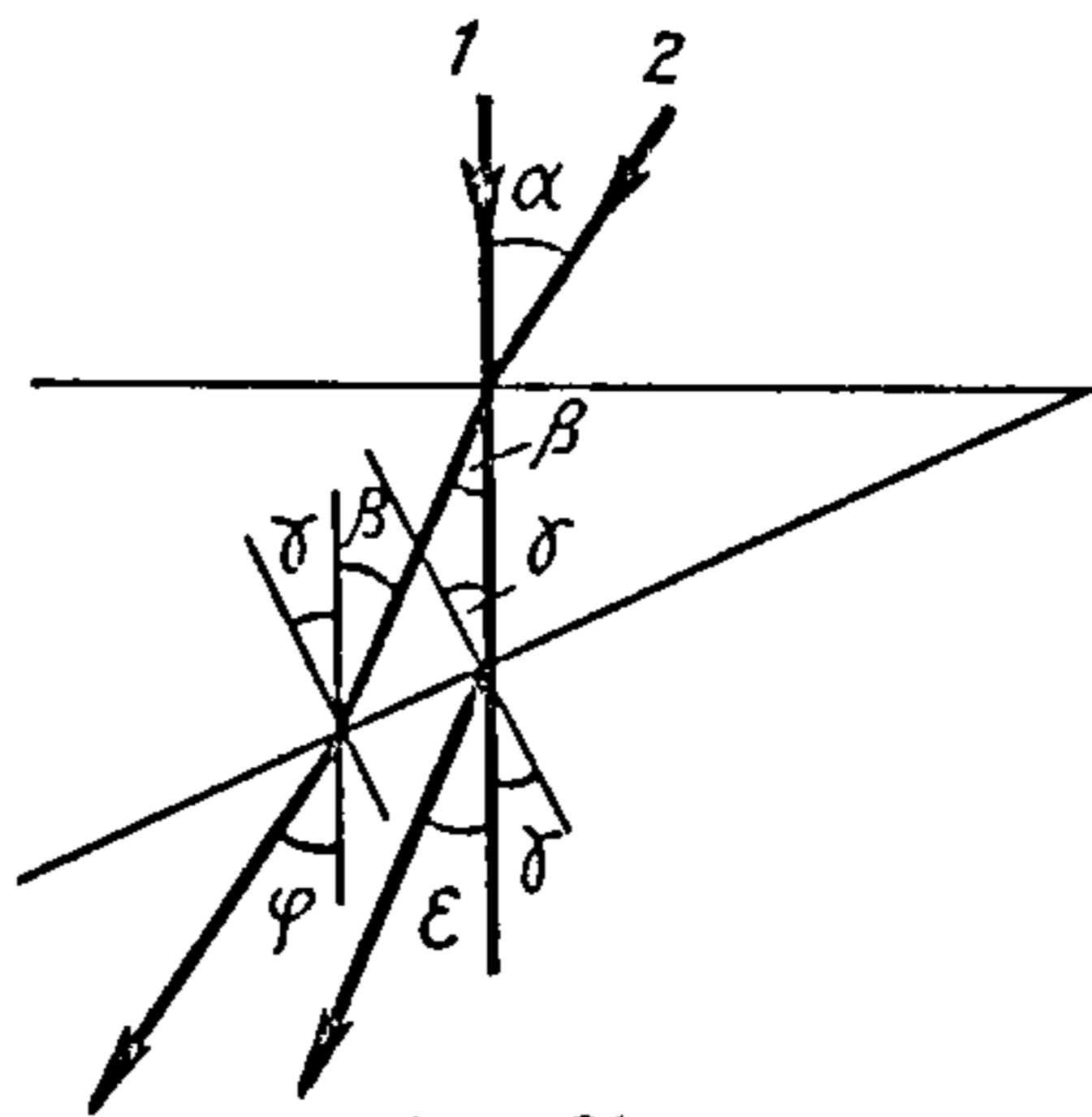
дзе  $\Delta l$  — адлегласць паміж прамянямі,  $\beta_{\text{ч}}$  — вугал праламлення для чырвоных прамянёў,  $\beta_{\text{ф}}$  — для фіялетавых прамянёў. 26.17.  $\operatorname{tg}\alpha = n$ , дзе  $n$  — паказчык праламлення шкла. 26.18.  $0,254 \cdot 10^{-6}$  м. 26.19.  $24^\circ 24'$ . 26.20. Другі прамень таксама цалкам унутрана адаб'ецца на мяжы шкла — паветра і не выйдзе ў паветра. 26.21. 1,2 м. 26.22. 4,2 см. 26.23. Відарыс наблізіцца да люстэрка. 26.24. На рыс. 30  $AB$  — фронт плоскай хвалі ў паветры,  $A'B'$  — фронт плоскай хвалі ў вадзе.  $\sin\alpha/\sin\beta = n_b$ ;  $\sin\alpha = 0,5/1,33 = 0,367$ ;  $\beta = 22^\circ 10'$ ;  $\cos\alpha = AB/A'B$ ;  $A'B = A'B'/\cos\alpha$ ;  $\sin\delta = A'B'/A'B$ . Адсюль



$A'B' = AB \sin \delta / \cos \alpha$ ;  $\sin \delta = \sin(90^\circ - \beta)$ . Таким чином,  $A'B' = AB \cos \beta / \cos \alpha = 5,35$  см. 26.25. 7,4 м. 26.26.

$$|SS'| = 2\left(h + \frac{d}{n}\right) = 2\left(h + \frac{3}{4}d\right).$$

26.27. Вуглы малыя (рыс. 31) па закону праламлення  $\sin(\epsilon + \gamma) / \sin \gamma = n$ ;  $(\epsilon + \gamma) / \gamma = n$ ;  $\epsilon = \gamma(n - 1)$ ;  $\sin \alpha / \sin \beta = n$ ;  $\alpha / \beta = n$ ;  $\beta = \alpha / n$ ;  $\sin(\varphi + \gamma) / \sin(\beta + \gamma) = n$ ;  $(\varphi + \gamma) / (\beta + \gamma) = n$ ;  $\varphi = n\beta + (n - 1)\gamma = \alpha + \gamma(n - 1)$ . Адсюль  $\varphi - \epsilon = \alpha$ , г.зн. прамень 2 павернуты адносна праламленага праменя 1 на вугал  $\alpha$ . 26.28.  $77^\circ 12'$ . 26.30.  $\alpha = 35^\circ$ . 26.31.  $n = 1,41$ . 26.32.  $\sin \beta = \sin \alpha / n$  (1). З рыс. 26.4 можна ўбачыць,



Рыс. 31

што  $\sin(\pi/2 - \beta) = \cos \beta \geq 1/n$ . Максімальнае значэнне  $\beta$  пры  $\alpha = \pi/2$  з формулы (1)  $\sin \beta = 1/n$ ;  $1 \geq 2/n^2$ . Таму  $n \geq \sqrt{2}$ . Гэтую з'яву выкарыстоўваюць у так званай вала-

коннай опыцы. 26.33. Становіцца пучка, які выходзіць з шара, вызначаецца з'явай поўнага адбіцця святла (рыс. 32):

$$n \sin \alpha = 1; \alpha = \arcsin(1/2) = 30^\circ.$$

$$x = |AO| + |AB| = R / \sin 30^\circ + R / \tan 30^\circ = R(2 + \sqrt{3}); x' = 3,73.$$

$$26.34. \varphi = 2(\alpha - \beta) = 18^\circ. 26.39.$$

$$D_{\text{ст}} / D_{\text{ал}} = 0,35. 26.44. f = 0,3 \text{ м};$$

$$H = 4 \text{ см}. 26.45. F = \sqrt{l}. 26.46.$$

$$1,31. 26.47. F' = 2F(n_1 - 1)n_2 / (2n_1 - n_2 - 1) = 50 \text{ см}, \text{ дзе } F' \text{ — фокусная адлегласць лінзы ў вадзе; } n_1 \text{ — паказчык праламлення шкла; } n_2 \text{ — паказчык}$$

$$\text{праламлення вады; } F \text{ — фокусная адлегласць лінзы ў паветры. } F' = 0,5 \text{ м.}$$

$$26.48. F = 9 \text{ см}. 26.49. \text{Экран трэба аддаліць ад лінзы на адлегласць } 1 \text{ см.}$$

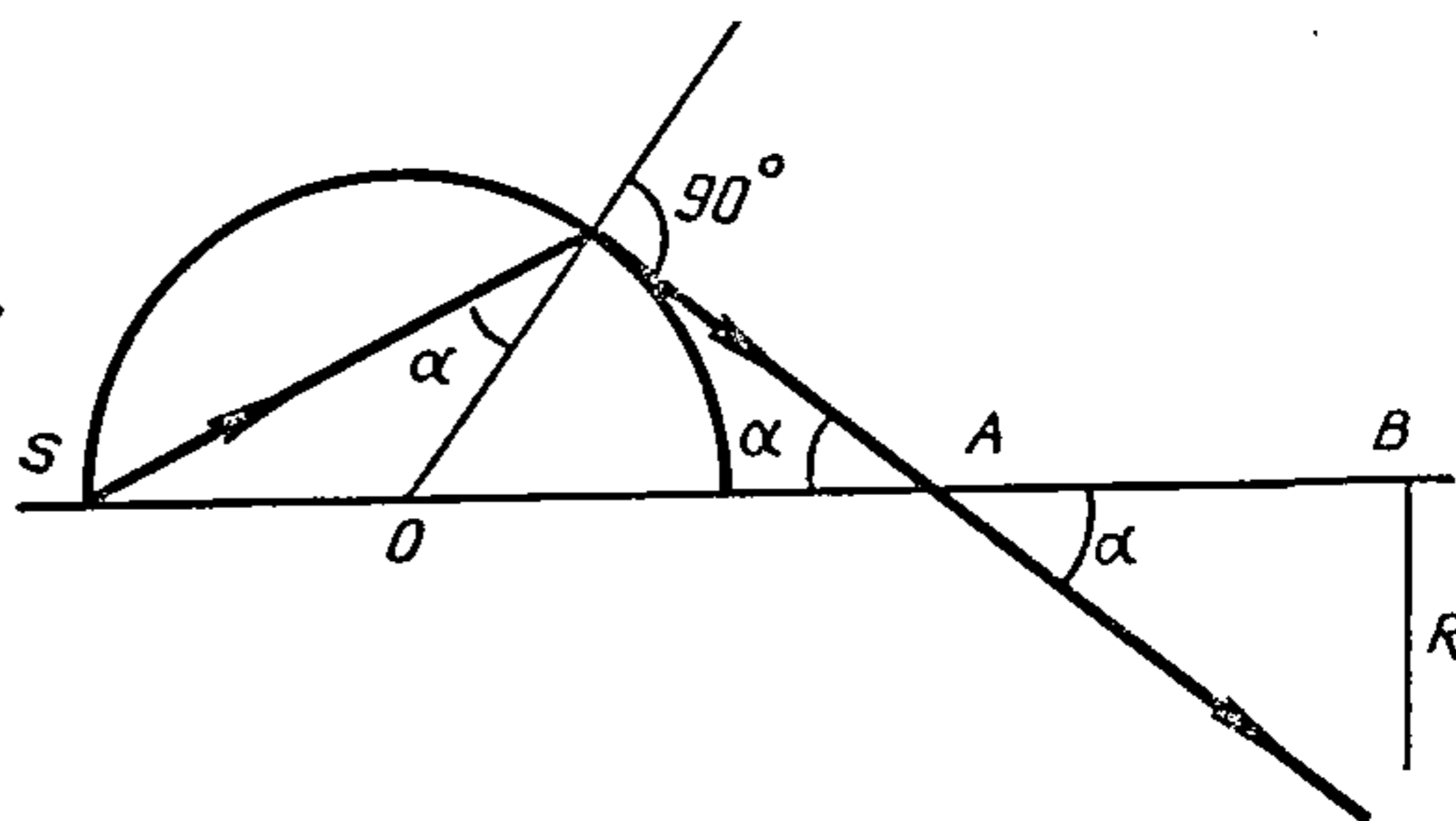
$$26.50. h = \sqrt{H_1 H_2}. 26.51.$$

$$\frac{v}{v_1} = \frac{F}{(d_1 - F)(d_2 - F)} = 3,3,$$

дзе  $v$  — скорасць перамяшчэння відарыса;  $v'$  — скорасць перамяшчэння прадмета. 26.52.

$$R = \frac{2(F_{\text{ч}} - F_{\text{ф}})}{1/(n_{\text{ч}} - 1) - 1/(n_{\text{ф}} - 1)} = 0,5 \text{ м},$$

дзе  $F_{\text{ч}}$  — фокусная адлегласць лінзы для чырвоных прамянёў;  $F_{\text{ф}}$  — для фіялетавых прамянёў;  $n_{\text{ч}}$  і  $n_{\text{ф}}$  — паказчыкі праламлення лінзы для чырво-



Рыс. 32

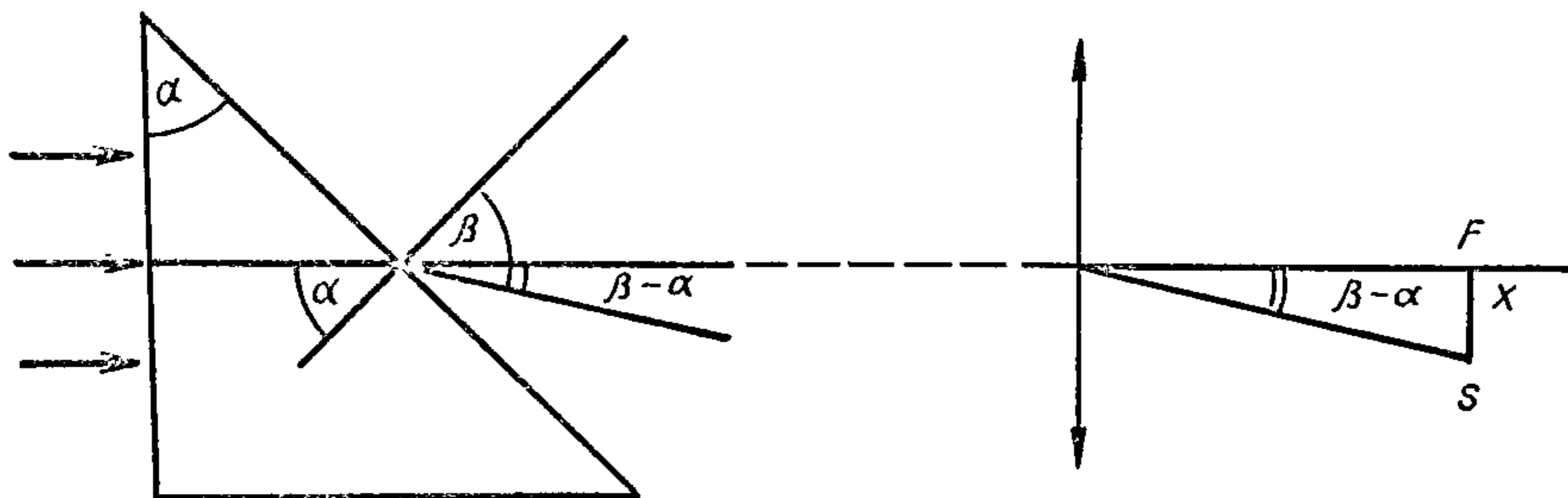
ных і фіялетавак прамянёў. 26.53. Павялічыцца, бо павялічыцца радыус крывізны і паменшыцца паказчык праламлення. 26.54. Трэба, каб супалі іх галоўныя фокусы. Калі фокусная адлегласць збіральнай лінзы меншая за фокусную адлегласць расейвальнай, рашэнне немагчымае. 26.56. Аптычная сіла гэтай сістэмы  $D = D_1 + D_2 + D_1 = 2D_1 + D_2$ , дзе  $D$  — аптычная сіла лінзы;  $D_2$  — аптычная сіла люстра.  $D_1 = 1/0,4 = 2,5$  дптр;  $D_2 = 0$ ;  $D = 5$  дптр;  $1/h + 1/h' = 5$ ;  $h' = h/(5h - 1) = -0,2$  м. Відарыс у пункце  $S$  будзе няяўны. 26.57. Для стану найменшага адхілення  $n = \sin((A + \delta)/2) / \sin(A/2)$ , дзе  $A$  — праламляльны вугал прызмы;  $\delta$  — вугал найменшага адхілення. Калі паказчык праламлення для некаторага праменя  $n + \Delta n$ , то вугал найменшага адхілення  $\delta + \Delta\delta$ ,  $\Delta n$  і  $\Delta\delta$  звязаны паміж сабой формуламі

$$\Delta n = \frac{1}{2} \frac{\cos(A + \delta)/2}{\sin(A/2)} \Delta\delta.$$

Тады адлегласць паміж спектральнымі лініямі:  $\Delta l = F\Delta\delta$ , дзе  $F$  — фокусная адлегласць лінзы. Вугал  $\delta$  вызначаецца з формулы:  $\sin(60 + \delta)/2 = 1,4881 \sin 30^\circ$ ;  $\delta = 36^\circ$ ;

$$\Delta l = 2 \sin \frac{A}{2} F \frac{\Delta n}{\cos(A + \delta)/2} = 74 \text{ нм.}$$

26.58. Прызма адхіляе пучок прамянёў ад галоўнай аптычнай восі лінзы на вугал  $\beta - \alpha$  (рыс. 33). Пучок застаецца паралельным. Прамяні збяруцца ў



Рыс. 33

фокальнай плоскасці лінзы, у пункце  $S$  на адлегласці  $x$  ад аптычнай восі:

$$x = F \operatorname{tg}(\alpha - \beta) = F \frac{\operatorname{tg}\beta - 1}{\operatorname{tg}\beta + 1} \quad (1);$$

$\operatorname{tg}\alpha = 1$ ,  $\sin\beta / \sin\alpha = n$ . У выніку  $\sin\beta = n\sqrt{2}/2$ ;  $\operatorname{tg}\beta = n/\sqrt{2 - n^2}$  (2). Падставім (2) у (1):

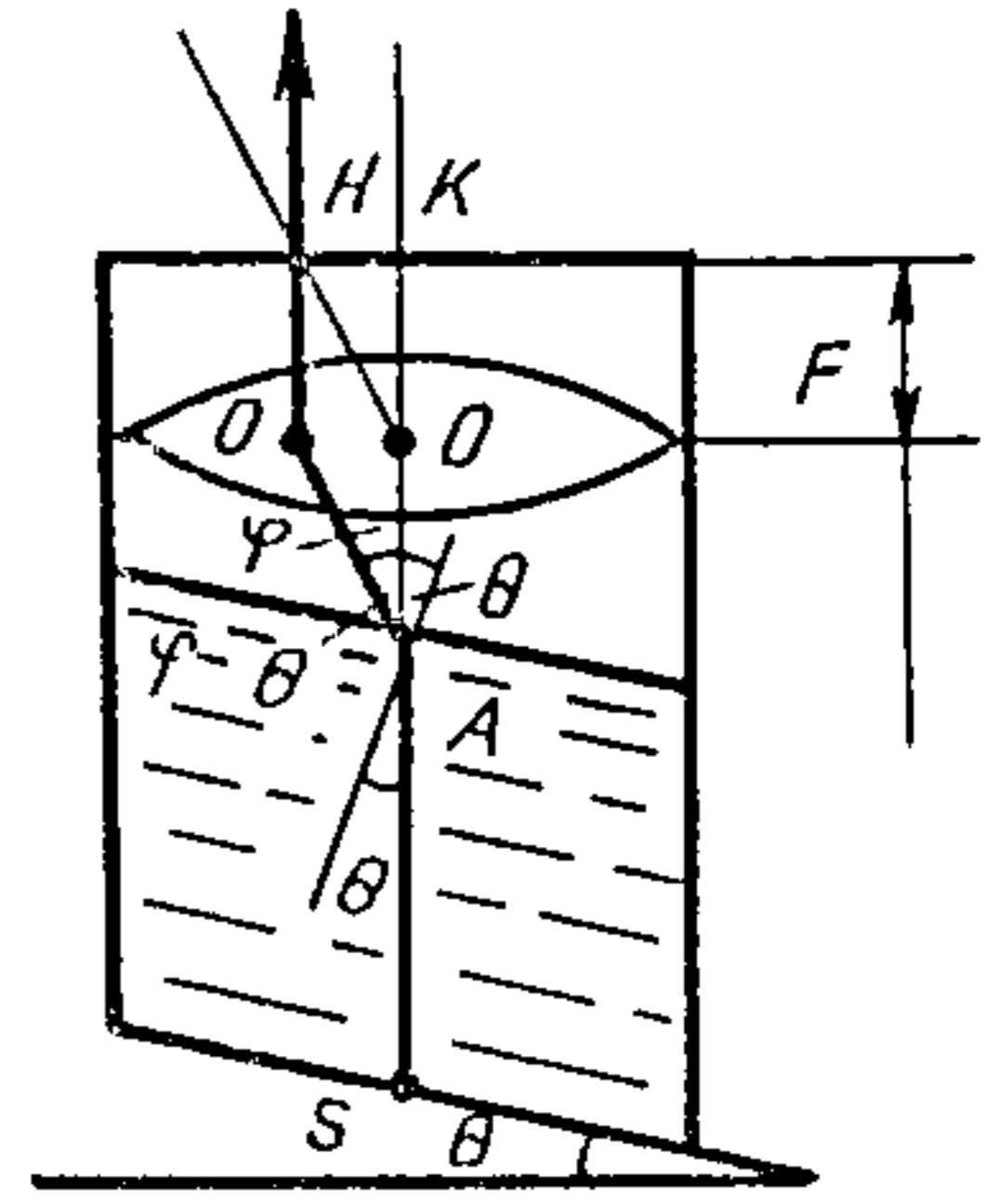
$$x = F \frac{n - \sqrt{2 - n^2}}{n + \sqrt{2 - n^2}}.$$

26.59.  $H = hF_2/F_1 = 1,2$  см, дзе  $h$  — вышыня аб'екта. 26.60.  $f_2 = 13,3$  см.

26.61.

$$f = \frac{F[2l(1/F - 1/d) - 1]}{2l(1/F - 1/d) + F/d - 2}$$

Канчатковы відарыс будзе ўяўным, калі  $S_2$  знаходзіцца паміж лінзай і яе правым фокусам. Калі  $l=0$ , відарыс будзе ўяўным пры  $d < F/2$  і сапраўдным пры  $d > F/2$ . 26.62. Пры ўсталяваным руху паскарэнне пасудзіны і вадкасці ў ёй  $a = g \sin \theta$ . Павярхня вадкасці ў пасудзіне, якая рухаецца, паралельна нахільнай плоскасці (рыс. 34). На падставе закона праламлення святла  $n \sin \theta = \sin \varphi$  будзем мець:  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\varphi - \theta = 30^\circ$ . Няхай  $OH \parallel AB$ ; прамяні  $OH$  і  $BH$  збіраюцца ў адным пункце



Рыс. 34

у адным пункце фокальнай плоскасці  $HK = F \tan(\varphi - \theta) = 5,8$  см, дзе  $F$  — фокусная адлегласць лінзы. 26.63.  $l = F_1 + F_2 = n(R_1 + R_2)/(n - 1) = 75$  см, дзе  $F_1$  і  $F_2$  — фокусныя адлегласці павярхняў лінзы;  $R_1$  і  $R_2$  — радыусы крывізны;  $n$  — паказчык праламлення матэрыялу лінзы;  $l$  — таўшчыня лінзы. Калі другая павярхня лінзы ўвагнутая, то  $l = F_1 - F_2 = n(R_1 - R_2)/(n - 1) = 45$  см.

26.64. Збіральныя, дальназоркасць. 26.65. +2 дптр. 26.66. На 3,5 дптр. 26.67.  $D_p = -5,3$  дптр;  $D_c = 21,3$  дптр. 26.68. 24 разы. 26.69. 180 разоў. 26.70. Трэба, каб фокусы аб'ектыва і акулярна супалі. 26.71.  $d = 0,3$  м;  $\Gamma = 300$ . 26.72.  $F = 1,6$  см;  $l = 17,9$  см. 26.73.  $d = 70$  м. 26.74.  $h = 400$  м;  $v = 50$  м/с. 26.75.  $F = 1,6$  м. 26.76.  $10^\circ 20'$ . 26.77. 12 разоў. 26.78.  $x_1 = 20$  см;  $x_2 = 80$  см ад збіральнай лінзы.

27.1. 3,92. 27.2. 754 лм. 27.3. 192,8 лм. 27.4. Павялічыцца ў 5 разоў. 27.5.  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 = I\Omega_1 + \eta I\Omega_2 \approx 7,7 \cdot 10^3$  лм;  $\Omega$  — цялесны вугал. 27.6.

0,6 дптр. 27.7.  $E = 1/F^2 = 400$  лк. 27.8. Паменшыцца ў 1,16 раза. 27.9. 6 лк.

27.10.  $l = \sqrt{r^2(3\sqrt{4} - 1)} = 4$  м, дзе  $r$  — адлегласць ад лямпы да цэнтры пляцоўкі.

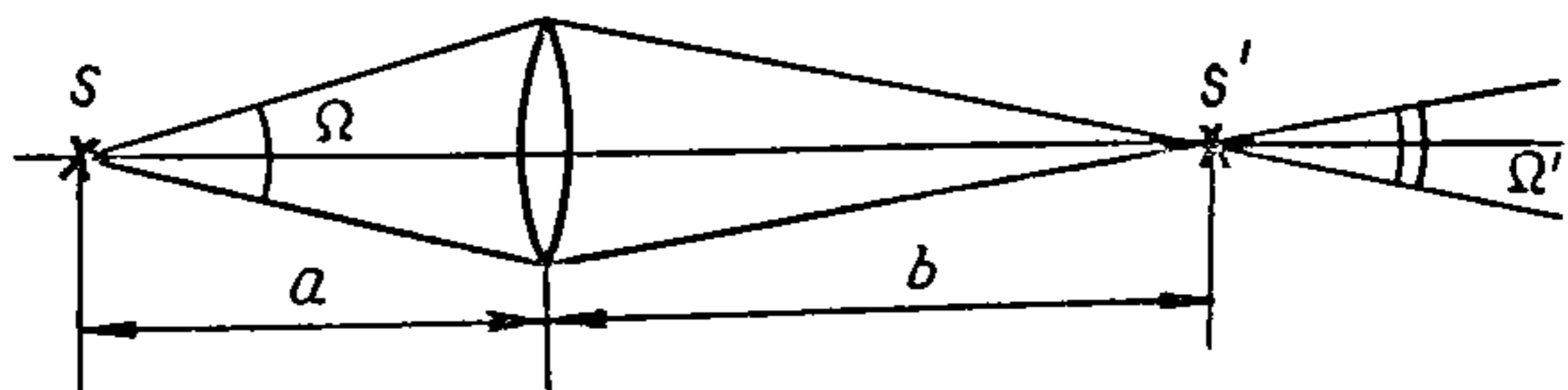
27.11. Відарыс будзе менш яркім. 27.12. У  $8 \cdot 10^5$  разоў менш. 27.13. У 1/4 раза.

27.14.  $E = \eta N / (\Omega R^2)$ . 27.15. 7,38 с. 27.16.  $E_0/E = 16/9$ , дзе  $E_0$  — асветленасць пляцоўкі пры фатаграфаванні ў натуральную велічыню.

27.17.  $E/E_0 = 4$ , дзе  $E_0$  — асветленасць пры фатаграфаванні цалкам. 27.18. 18 с.

27.19.  $10^{-5}$  с. 27.20.  $D_2/D_1 = 5/6$ , дзе  $D_2$  і  $D_1$  — дыяметры дыяфрагмы. 27.21.

Сіла святла ў пучку за лінзай  $I' = \Phi'/\Omega$ , дзе  $\Phi'$  — светлавы паток, які прайшоў лінзу і распаўсюджваецца ў цялесным вугле  $\Omega$  (рыс. 35).  $\Phi =$



Рыс. 35



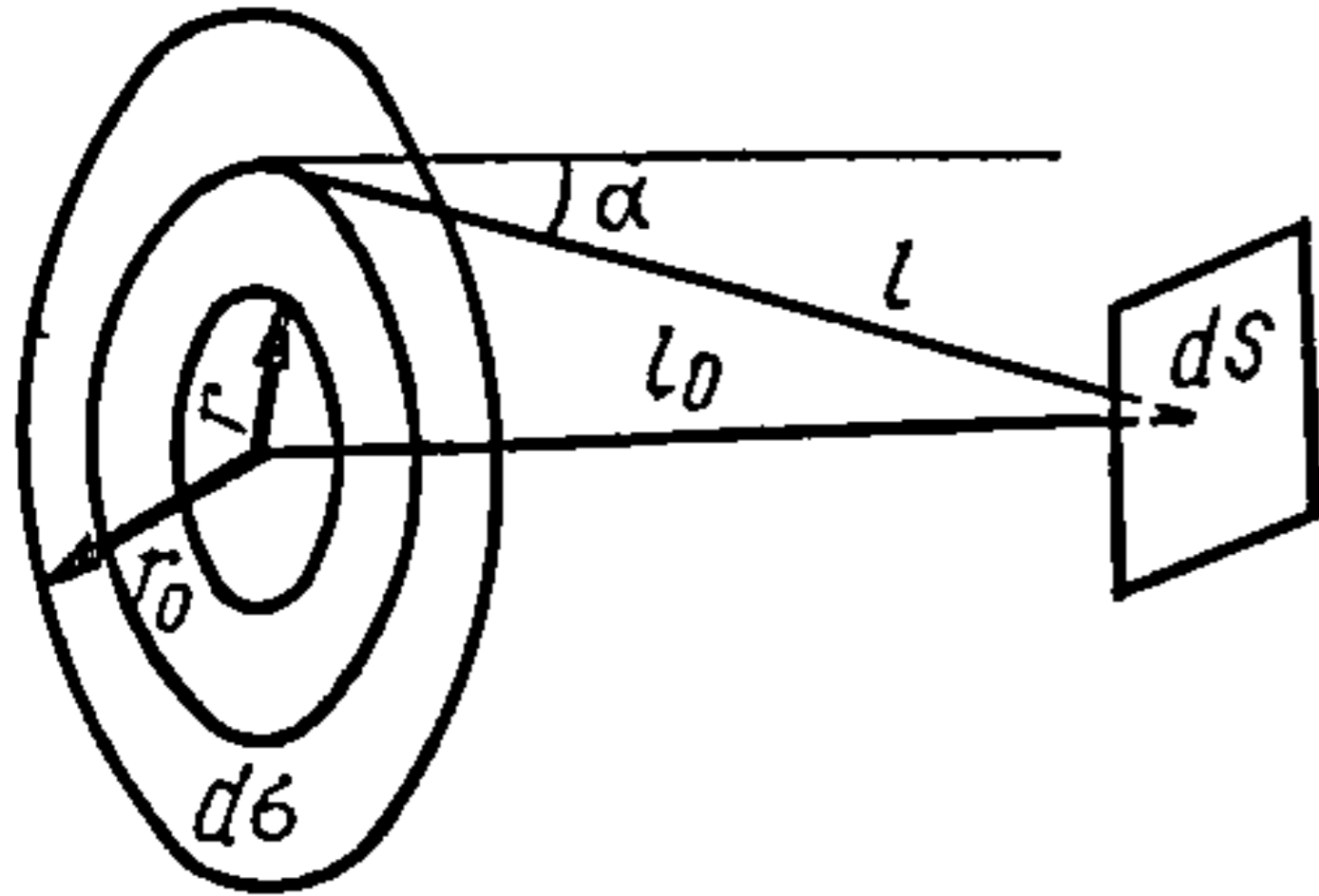
$= \Phi_1; \Omega \approx \pi D^2 / (4a^2); \Omega' = \pi D^2 / (4b^2)$ , дзе  $D$  — дыяметр лінзы,  $a \gg D$  і  $b \gg D$ .

Вызначым сілу святла відарыса крыніцы  $S'$ :

$$I' = \frac{\Phi'}{\Omega'} = \frac{\Phi}{\Omega'} = \frac{I\Omega}{\Omega'} = I \left( \frac{b}{a} \right)^2.$$

Па формуле лінзы  $1/a + 1/b = 1/F$ . Тады  $I' = I(F/(a-F))^2 = 4$  кд. 27.22. 100 кд.

27.23.  $12 \cdot 10^6$  кд/м<sup>2</sup>;  $3 \cdot 10^4$  кд/м<sup>2</sup>. 27.24. Сіла святла, якую стварае элемент плошчы  $d\sigma$  у напрамку  $\alpha$  да нармалі:  $dI = Ld\sigma \cos\alpha$ . Светлавы паток у цялесным вугле (рыс. 36)



Рыс. 36

$$\alpha\Phi = Ld\sigma \cos\alpha \frac{\Delta S \cos\alpha}{l^2}.$$

Асветленасць на пляцоўцы  $\Delta S$ , якую стварае элемент паверхні  $d\sigma$ ,  $dE = (Ld\sigma \cos^2 \alpha) / l^2$ ;  $l = l_0 / \cos\alpha$ , а  $d\sigma = 2\pi r dr$ ;  $r = l_0 \tan\alpha$ . Адсюль

$$dr = \frac{l_0}{\cos^2 \alpha} d\alpha;$$

$$dE = 2\pi L \sin\alpha \cos\alpha d\alpha;$$

$$E = 2\pi L \int_0^{\alpha_1} \sin\alpha \cos\alpha d\alpha = \pi L \sin^2 \alpha \Big|_0^{\alpha_1} = \pi L \frac{r_0^2}{r_0^2 + l_0^2};$$

$$\sin\alpha_1 = \frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + l_0^2}}; \quad E = 276 \text{ лк.}$$

Калі лічыць дыск пунктавай крыніцай, то  $E_1 = \pi L r_0^2 / l_0^2$ ;  $(E_1 - E) / E = r_0^2 / l_0^2 = 2,25\%$ . 27.25.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} \frac{S_2}{S_1} = \frac{d^2}{D^2} \frac{R^2}{4F_1^2} = 6,25,$$

дзе  $E_1$  — асветленасць пры выкарыстоўванні лінзы;  $E_2$  — асветленасць пры выкарыстоўванні люстра. Такім чынам, з дапамогай лінзы можна атрымаць больш высокую тэмпературу. 27.26. Пры умове 1 асветленасць відарыса пры выкарыстоўванні тэлескопа будзе менш, чым без яго. Пры умове 2 тэлескоп не змяняе асветленасць. 28.1.  $\varphi = 56^\circ 12'$ . 28.2. Па формуле Фрэнеля інтэнсіўнасць адбітага праменя

$$I = \frac{1}{2} I_0 \left[ \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} + \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)} \right],$$

дзе  $I_0$  — інтэнсіўнасць натуральнага святла. Пры поўнай палярызацыі  $\alpha_B +$

$+\beta = \pi/2$ , дзе  $\alpha_B$  — вугал Брустэра. Тады  $I = (1/2)I_0 \sin^2(\alpha_B - \beta)$ . Такім чынам,  $I/I_0 = (1/2) \sin^2(\alpha_B - \beta)$ ;  $\operatorname{tg} \alpha_B = n_{21}$ ;  $\operatorname{tg} \alpha_B = 1,52$ ;  $\alpha_B = 56^\circ 40'$ ;  $\beta = 90^\circ - 56^\circ 40' = 33^\circ 20'$ ;  $\alpha_B - \beta = 56^\circ 40' - 33^\circ 20' = 23^\circ 20'$ ;  $I/I_0 = (1/2) \sin^2 23^\circ 20' = (1/2) 0,386^2 \approx 0,078$ . 28.3.  $32^\circ$ . 28.4.  $48^\circ 6'$ . 28.5.  $n = 1,43$ . 28.6. Коэфіцыент адбіцця  $R = I_1/I$ , дзе  $I_1$  — інтэнсіўнасць адбітага святла;  $I$  — інтэнсіўнасць падаючага святла;  $\alpha_B + \beta = \pi/2$ . Тады на падставе формулы Фрэнеля  $I' = I_1 = I_{\perp} \sin^2(\alpha_B - \beta)$ .

$R = (I_{\perp}/I_1) \sin^2(\alpha_B - \beta) = 0,5 \sin^2(\alpha_B - \beta) = 0,07$ . 28.7.  $100^\circ$ . 28.8.  $1/3$ . 28.9.  $0,9$ ;  $0,99$ . 28.10.  $45^\circ$ . 28.11.  $1/8$ . 28.12. У 2 разы. 28.13. У 12 разоў. 28.14.  $I_{\text{нат}} = I_{\text{пал}}$ . 28.15. Ступень палярызацыі вызначаецца формулай  $P = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})/(I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$  (1). Да паварота нікаля ён прапускае святло з інтэнсіўнасцю  $I_1 = I_{\text{max}}$ , а пасля павароту (рыс. 37)  $I_2 = I_{\text{max}} \cos^2 \varphi + I_{\text{min}} \sin^2 \varphi$ ;

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{max}} \cos^2 \varphi + I_{\text{min}} \sin^2 \varphi} = \frac{1}{\cos^2 \varphi + \frac{I_{\text{min}}}{I_{\text{max}}} \sin^2 \varphi} \quad (2)$$

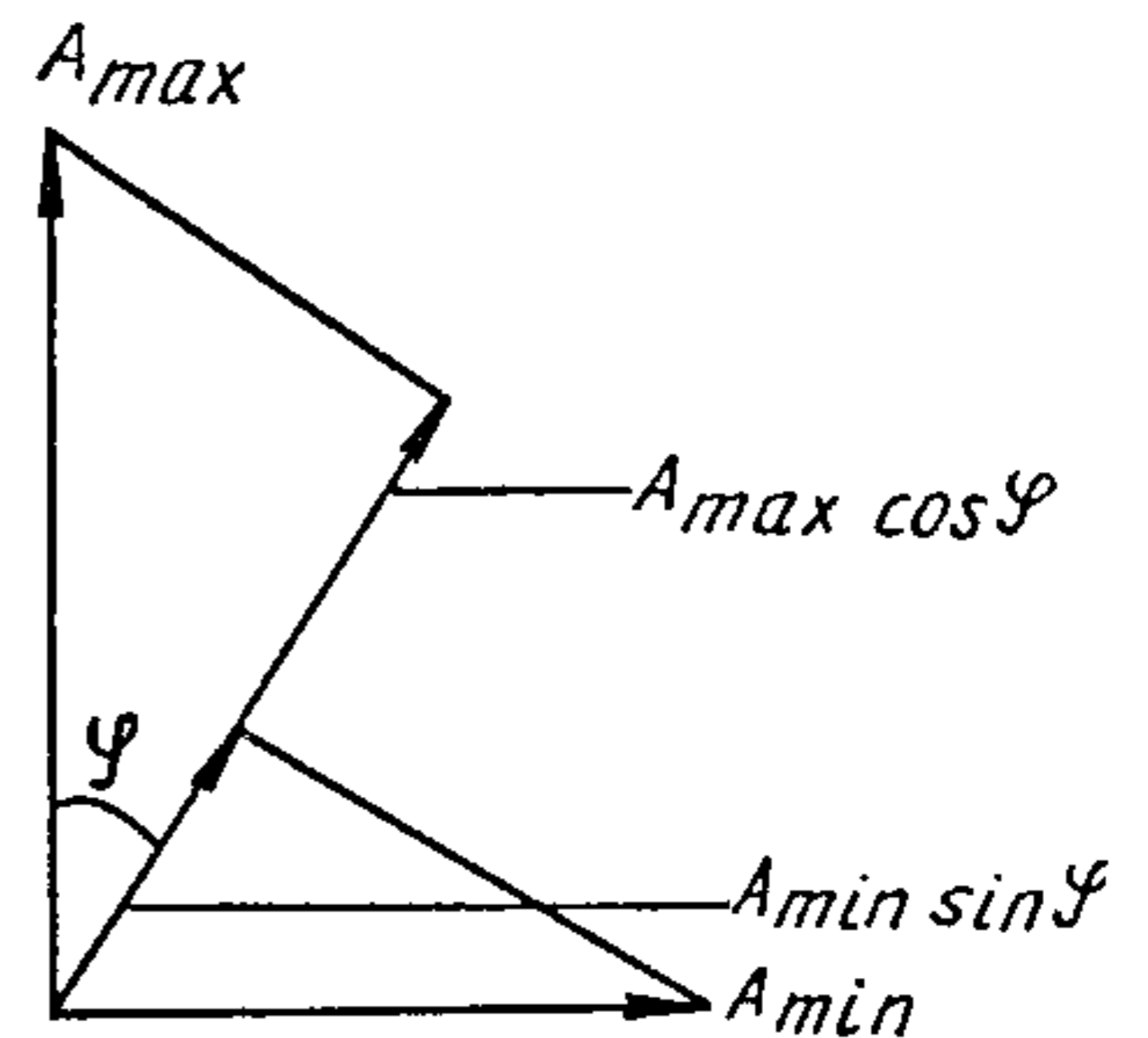
З формулы (1)  $I_{\text{max}}/I_{\text{min}} = (1+P)/(1-P)$ . Падставіўшы ў формулу (2), атрымаем  $I_1/I_2 = (1+P)/[1+P(1-2\sin^2 \varphi)]$ . 28.16. Паменшыцца ў 1,23 разы. 28.17.  $I_3/I_0 = \cos^2 \alpha \cos^2(90 - \alpha)/2 = 0,094$ , дзе  $I_3$  — інтэнсіўнасць праменя, які прайшоў праз трэці нікаль. 28.18.

$$I = \frac{1}{2} I_0 \cos^4 \alpha.$$

28.19.  $14,7$  мкм. 28.20.  $1,55$ . 28.21.

$$(n_e - n_o) \frac{x}{\lambda} = \frac{1}{4},$$

дзе  $x$  — таўшчыня пласцінкі;  $x = 13,24$  мкм. 28.22.  $5,7$  мм. 28.23.  $4,5$  мм. 28.24.  $d = (1/\alpha) \arcsin \sqrt{2/n}$ . 28.25.  $\Delta n = \lambda / (\Delta x \operatorname{tg} \theta)$ . 28.26.  $250$  кг/м<sup>3</sup>. 28.27.  $240$  кг/м<sup>3</sup>. 28.28.  $5$  см. 29.1.  $\eta = 2B/\lambda^3$ , дзе  $\eta$  — дысперсія;  $v = c\lambda^2 / (A\lambda^2 + B)$ , дзе  $v$  — фазавая скорасць;  $u = [c\lambda^2 (A\lambda^2 - B)] / (A\lambda^2 + B)^2$ , дзе  $u$  — груповаая скорасць. 29.2.  $u = 1,7 \cdot 10^8$  м/с. 29.3.  $v = 2,24 \cdot 10^8$  м/с;  $u = 2,20 \cdot 10^8$  м/с. 29.4.  $u = c^2/v$ . 29.5.  $d = 2,3/k$ . 29.6.  $k = 0,14$  см<sup>-1</sup>. 29.7.  $0,8$ . 29.8.  $k = 0,35$  см<sup>-1</sup>. 29.9.  $42$  см; на  $10\%$ . 29.10.  $K_2 = (K_1 \lg N_2) / \lg N_1$ . 29.11.  $n = 8$ . 29.12.  $1\%$ . 29.13.  $0,67$ . 29.14.  $0,52$ . 29.15.  $k' = 0,067$  см<sup>-1</sup>. 29.16. У 4 разы.



Рыс. 37

29.17.  $v = 1,88 \cdot 10^8$  м/с. 29.18.  $2 \cdot 10^8$  м/с;  $2,56 \cdot 10^8$  м/с. 29.19.  $30^\circ$ . 29.20.  $2 \cdot 10^8$  м/с;  $2,56 \cdot 10^8$  м/с. 30.1.  $3 \cdot 10^8$  м/с. 30.2.  $\Delta N = 0,10$ . 30.3.  $v = 0,141$  с, дзе с — скорасць святла. 30.4. Частата меншая за  $\nu_0$  на 10 кГц. 30.5.

$$v = \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{\lambda_2 + \lambda_1} c = 0,549 c.$$

30.6. Калі самалёт набліжаецца,  $\nu = \nu' = \nu_0 / (1 - v/c)$ . Калі самалёт аддаляецца,  $\nu = \nu'' = \nu_0 / (1 + v/c)$ . Вызначым  $v = (\nu' - \nu'') / (\nu' + \nu'')$ . 30.7. На 180 нм. 30.8.  $\lambda_0 = 600$  нм. 30.9. 0,84 пм. 30.10.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v n}{c} \cos\varphi,$$

дзе  $\varphi$  — вугал паміж напрамкам назірання і напрамкам руху. 30.11.  $\Delta\lambda = 2Nv\lambda/c$ . 30.12.

$$T = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \frac{4\pi R}{c} = 25 \text{ сут},$$

дзе  $R$  — радыус Сонца. 30.13.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{2}{c} \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = 1,8 \cdot 10^{-5}.$$

30.14.  $v = 1,98$  км/с.

## КВАНТАВАЯ ФІЗІКА

31.1. 1) 0,284 адж; 2) 0,361 адж; 3) 0,497 адж; 4) 0,02 адж. 31.2. У 60 разоў. 31.3. Не належыць. 31.4. 2 мкм — інфрачырвоная частка спектра. 31.5. 12,4 фм. 31.6. 1,07 ПГц; 1,18 ПГц;  $E_2/E_1 = 1,1$ . 31.7. 1)  $5,52 \cdot 10^{-36}$  кг і  $1,1 \times 10^{-33}$  кг; 2)  $9,6 \cdot 10^{-31}$  кг. 31.8. 2,42 пм. 31.9. 1,33 пм. 31.10.  $5,33 \times 10^{-22}$  кг·м/с. 31.11. 1,99 фДж;  $2,2 \cdot 10^{-32}$  кг;  $6,625 \cdot 10^{-24}$  кг·м/с; 99,4 фДж;  $1,1 \cdot 10^{-30}$  кг;  $3,31 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с. 31.12.  $2 \cdot 10^{11}$ . 31.13.

$$n = \eta \frac{N\lambda t}{hc} = 3 \cdot 10^{17} \text{ с}^{-1}.$$

31.14.  $N_1/N_2 = 3/4$ . 31.15.  $T = 2hc/(3k\lambda) = 96$  МК. 31.16.  $A = hc/\lambda_0 = 4,2$  эВ.

31.17. Не будзе, бо энергія кванта роўная 2,11 эВ і яна меншая за работу выхаду электронаў з металу на 0,29 эВ. 31.18. 235 нм; 262 нм; 276 нм; 305 нм; 631 нм. 31.19. 4,7 эВ; 4,5 эВ; 2,4 эВ; 2,3 эВ; 2,0 эВ. 31.20.  $v = \sqrt{2hc/(m\lambda)} = 600$  Мм/с. Атрыманы недарэчны вынік  $v > c$ , бо не ўлічвалася залежнасць масы электрона ад скорасці яго руху. 31.21.  $v = \sqrt{2(hc - A\lambda)/(m\lambda)} = 840$  км/с. 31.22. 213 нм. 31.23. 0,994 адж (6,2 эВ); 5 эВ; 0,192 адж; 650 км/с. 31.24. На 0,6 эВ. 31.25.  $\lambda = hc/(e\varphi) = 10$  нм. 31.26. 23,3 эВ. 31.27.



$$\varphi = \frac{hc}{e} \frac{\lambda_k - \lambda}{\lambda_k \lambda} = 10,9 \text{ В.}$$

31.28. 0,75 В. 31.29.  $6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. 31.30. 3,5 мкПа; 7 мкПа. 31.31. 1) 46,6 мкПа; 2) 23,3 мкПа. 31.32. 37,5 МВт/м<sup>2</sup>. 31.33. 4,7 мкПа; 2)  $4,02 \times 10^{-16}$  кг. 31.34.

$$p = \frac{N}{cS} (1 + \rho) = 54 \text{ мкПа.}$$

31.35.

$$p = \frac{I}{c} (1 + \rho) = \frac{nh}{\lambda S} (1 + \rho) = 2,25 \text{ мкПа.}$$

31.36.

$$p = \frac{N}{4\pi r^2 c} (1 + \rho) = 24 \text{ нПа.}$$

31.37.

$$F = \frac{NS}{4\pi r^2 c} (1 + \rho) = 0,96 \text{ мкН.}$$

31.38.

$$p_c / p_r = \frac{0,8N}{4\pi r^2 p_r c} = 1,9 \text{ раза.}$$

31.39. 39 м. 31.40.  $\lambda_{\min} = 2\pi\hbar c / (eU) = 3,1 \cdot 10^{-11}$  м. 31.41. 59,3 Мм/с. 31.42.  $v = \sqrt{2hc / (m\lambda)} = 29,5$  Мм/с. 31.43.  $3 \cdot mv^2 / 2 = h\nu$  знаходзім

$$v = \frac{m_0 v^2}{2h\sqrt{1 - \beta^2}} = 7,3 \text{ ЭГц.}$$

31.44.  $6,61 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. 31.45. 45 кВ. 31.46. 843 пм. 31.47. 5 кэВ. 31.48. 154 пм. 31.49. Co, Ni. 31.50.  $\Delta\lambda = 92$  пм. 31.51.

$$Z = 1 + \sqrt{\frac{2(n-1)}{3\pi\hbar c R (n/(eU_1) - 1/(eU_2))}} = 29.$$

31.52. Лінія  $K_\lambda$  праявіцца толькі ў тым выпадку, калі яна не будзе ляжаць за мяжой суцэльнага спектра, гэта значыць  $\lambda_a > hc / (eU)$ . Адкуль  $U > hc / (e\lambda_a)$ , або  $U > 3\hbar c R (Z - \sigma)^2 / (4e)$ ;  $U > 17,2$  кВ. 31.53. 1) Свабоднымі з'яўляюцца тыя электроны, энергія сувязі якіх значна меншая за энергію, што перадаецца рассеяваючымі квантамі; 2) У гэтым выпадку энергія сувязі электронаў такога ж парадку, што і энергія налятаючых квантаў; такім чынам, свабодных электронаў няма. 31.54. Чым мацней звязаны электрон у атаме,

тым менш энергіі ён можа атрымаць ад падаючага кванта. У лёгкіх элементах электроны слаба звязаны, у цяжкіх — энергія сувязі істотна ўзрастае і адносна колькасць моцна звязаных электронаў павялічваецца. 31.55. 1,32 фм. 31.56.  $\Delta\lambda = 2,4$  пм не залежыць ад даўжыні святла. Адноснае змяненне даўжыні хвалі: для бачнага святла  $0,48 \cdot 10^{-5}$ , а для  $\gamma$ -прамянёў 0,48. 31.57.  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = -2\lambda_c \sin^2(\varphi/2) = -1,2 \cdot 10^{-12}$  м. 31.58.  $\Delta\lambda_m = 2\lambda_c$ ; 4,8 пм і 2,6 фм. 31.59.  $\lambda' = \lambda + 2\lambda_c \sin^2(\varphi/2) = 59,9$  пм. 31.60. У 2,8 раза. 31.61. 26,7 пм. 31.62.  $90^\circ$ ;  $\Delta E = h\nu - h\nu' = hc(1/\lambda - 1/(\lambda + \Delta\lambda)) = hc\Delta\lambda / (\lambda(\lambda + \Delta\lambda)) = 24$  кэВ. 31.63.  $\Delta E = hc(1/\lambda - 1/\lambda') = (hc/\lambda)(2\lambda_c \sin^2\varphi/2) / (\lambda + 2\lambda_c \sin^2\varphi/2)$ ; 119 кэВ; 185 кэВ; 256 кэВ. 31.64.

$$E' = h\nu' = \frac{hc}{\lambda + 2\lambda_c \sin^2 \frac{\varphi}{2}} =$$

$$= \frac{E}{\lambda + 2 \frac{E}{m_0 c^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}} = 0,43 \text{ МэВ}; \quad E_k = E - E' = 0,32 \text{ МэВ};$$

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k^2 + 2m_0 c^2 (E_k + m_0 c^2)} = 3,83 \cdot 10^{-22} \text{ Н} \cdot \text{с}.$$

(дзе  $m_0$  — маса спакою электрона). 31.65.  $\lambda' = \lambda [1 + \alpha(1 - \cos\varphi)]$ , або  $\nu' = \nu / [1 + \alpha(1 - \cos\varphi)]$ , дзе  $\alpha = h\nu / (m_e c^2)$ .  $E_k = h(\nu - \nu') = h\nu\alpha(1 - \cos\varphi) / [1 + \alpha(1 - \cos\varphi)]$ ,  $1 - \cos\varphi = 2\alpha / [1 + (1 + \alpha)^2 \text{tg}\theta]$ . Тады  $E_k = h\nu \frac{2\alpha^2}{[1 + 2\alpha^2 + (1 + \alpha)^2 \text{tg}\theta]}$ . 31.66.  $I_0 / I = \exp(\mu_M \varphi d) = 1,94$  раза. 31.67.  $e^{\mu x} = I_0 / I$ , адкуль  $x = \ln 2 / (\rho \mu_M) = 0,9$  см. 31.68. 1000 К. 31.69.  $x = \ln 2 / \mu \approx 13,9$  см. 31.70. 200 К. 31.71. 3,85. 31.72. 3,85 ГДж. 31.73. 52,5 Вт. 31.74. Павялічыцца ў 16 разоў. 31.75.

$$\Delta T = T_1 ({}^4\sqrt{E_2 / E_1} - 1) = 126 \text{ К}.$$

31.76.  $R_{\vartheta 1} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$  і  $R_{\vartheta 2} = \sigma(T_1^4 - T_3^4)$ , дзе  $T_1$  — тэмпература катла з вадой;  $T_2$  — тэмпература паверхні рукі;  $T_3$  — тэмпература цела.  $R_{\vartheta 2} / R_{\vartheta 1} = 1,24$  раза. 31.77. 21,8 ГДж. 31.78. 0,7. 31.79. 0,69. 31.80. 0,15. 31.81.  $N = \sigma T^4 S = 1390$  Вт. 31.82. У 3,3 раза. 31.83.  $R_{\vartheta} = \sigma T^4$  і  $R_{\vartheta} = C \frac{4\pi R^2}{(4\pi r^2)}$ , дзе  $R$  — сярэдняя адлегласць ад Зямлі да Сонца;  $r$  — радыус Сонца. Тады  $\sigma T^4 = CR^2 / r^2$ , адкуль  $T = {}^4\sqrt{CR^2 / (\sigma r^2)} = 5800$  К. 31.84. Награванне спыніцца ў момант роўнасці паглынальнай і выпраменьвальнай энергіі:  $CSt = \sigma T^4 St$ ,

адкуль  $T = \sqrt[4]{C/\sigma} = 396 \text{ К}$ . 31.85. Колькасць цеплыні, якую аддае шар пры паніжэнні тэмпературы  $dT$ :  $dQ = cmdT = (4/3)\pi r^3 \rho c dT$ , дзе  $\rho$  — шчыльнасць жалеза. З другога боку,  $dQ = \sigma T^2 S dt$ , дзе  $dt$  — час выпраменьвання, які адпавядае паніжэнню тэмпературы на  $dT$ ;

$$dt = \frac{c\rho d}{6\sigma} T^{-4} dT.$$

Тады

$$t = \frac{7}{18} \frac{c\rho d}{\sigma T_1^3} = 34517 \text{ с}$$

(9 гадз. 35 мін 17 с). 31.86.  $t = c\rho d (1/T_2^3 - 1/T_1^3) / (18k\sigma) = 501 \text{ с}$  (8 мін 21 с).

31.87. 20 кК. 31.88. 0,5 мкм — вобласць бачнага спектра. 31.89. Нельга, бо  $\lambda_m = 242 \text{ нм}$ . 31.90. 1,45 кДж. 31.91. 1 мкм — інфрачырвоная вобласць. 31.92. 1870 Дж; 20,8 пг. 31.93. 7,5 кВт. 31.94. У 1,85 раза. 31.95. У 3,3 разы; 565 К. 31.96. 360 нм; у 3,1 раза. 31.97. Пры нізкіх частотах

$$h\nu \ll kT; f(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

не выконваецца (гл. крывую II, рыс. 38). Пры высокіх частотах  $h\nu \gg kT$

$$f(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right).$$

Гэтае выражэнне добра адлюстроўвае ізатэрму абсалютна чорнага цела ў вобласці больш за  $2 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$  (крывая III, рыс. 38). 31.98.

$$R_\Sigma = \int_0^\infty f(\omega, T) d\omega = \frac{h}{4\pi^2 c^2} \left(\frac{kT}{\hbar}\right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3 dx}{e^x - 1} =$$

$$= \frac{\pi^2 k^4}{60 c^2 \hbar^3} T^4 = 56 \cdot 10^{-8} \text{ Вт (м}^2 \cdot \text{К}^4) T^4 = \sigma T^4,$$

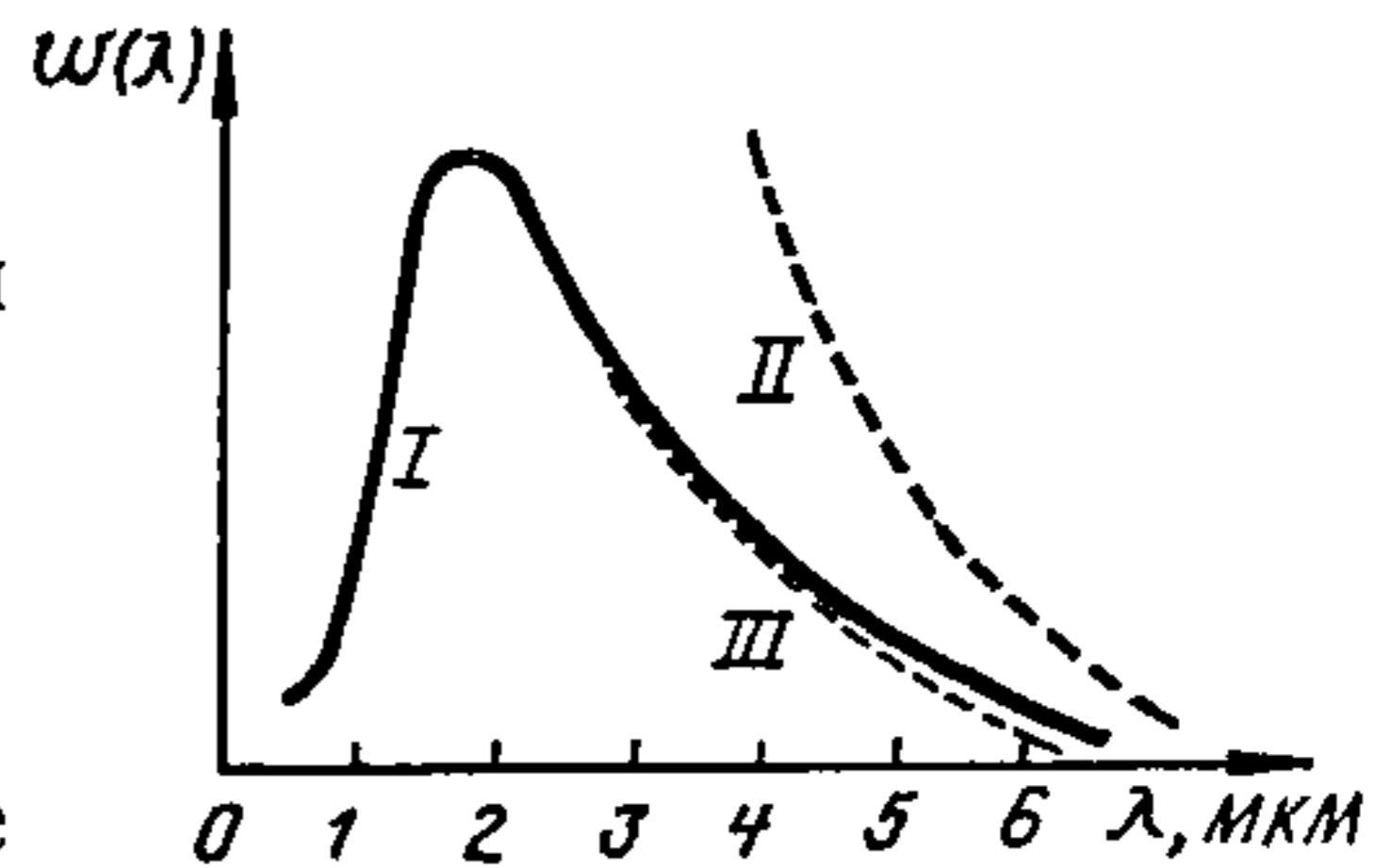
дзе  $x = \hbar\omega / (kT)$ . Пераўтварыць формулу Планка ў  $\varphi(\lambda, T)$  і прадэферэнцыраваць па

$$\lambda \frac{d\varphi(\lambda, T)}{d\lambda} = 0.$$

Атрымаем:

$$T\lambda = \frac{2\pi\hbar c}{4,965k} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} = b.$$

32.1. Магчымы. Фазавае скорасць не характарызуецца ні скорасцю «сігнала», ні скорасцю пераносу энергіі. 32.2. У абодвух выпадках скорасці



Рыс. 38



роўныя паміж сабой. 32.3.  $\lambda = 2\pi\hbar \sqrt{1 - v^2/c^2} / (m_0 v)$ ; 36,4 нм і 0,9 мкм.  
 32.4. 160 пм. 32.5. 7,3 пм; 6,9 пм. 32.6. 3 ураўненняў

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{h \sqrt{1 - \beta^2}}{m_0 c \beta} \quad \text{і} \quad E_k = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

маем:

$$\lambda = \frac{h c}{\sqrt{E_k (E_k + 2 m_0 c^2)}} = 2,86 \text{ пм.}$$

32.7. 0,45 кэВ. 32.8. Для дзвюх часцінак

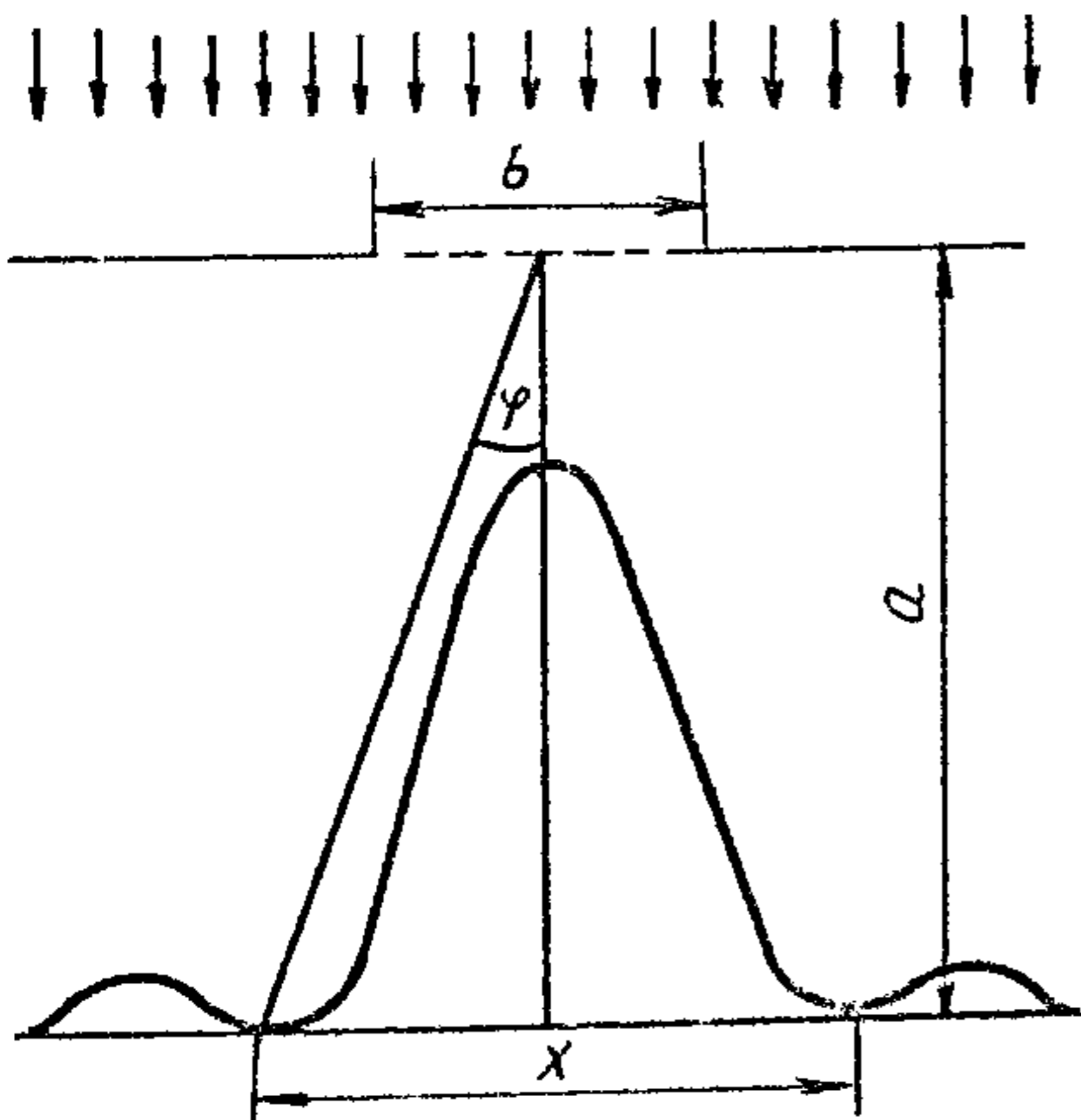
$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2 m_n E_k}} \left( 1 + \frac{m_n}{m_d} \right) = 7,84 \text{ пм,}$$

дзе  $m_n$  і  $m_d$  — масы нейтрона і дэйтэрыю. 32.9.  $\lambda = h / \sqrt{3 k m T}$ ; 73 пм; 145 пм;  
 28 пм. 32.10. Для электрона і малекулы кіслароду  $E_k = h^2 / (2 m \lambda^2)$ ; 150 эВ;  
 2,58 мэВ; 16,4 пэВ. 32.11.

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2 m E_k}} \frac{1}{\sqrt{1 + E_k / (2 m c^2)}}$$

32.12.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h c}{\sqrt{(m_0 c^2 + e U) e U}} = 1,4 \text{ пм.}$$



Рыс. 39

32.13.  $\lambda = \sqrt{\lambda_c \lambda_0} / 2 = 11 \text{ пм}$ , дзе  $\lambda_c$  — комптанаўская даўжыня хвалі. 32.14.

$$E_k = \frac{e^2 U^2}{2 m_p c^2} = 0,14 \text{ адж.}$$

32.15.  $x = 2 a \tan \varphi = 2 a \varphi$  (рыс. 39). З формулы  $b \sin \varphi = 2 k \lambda / 2$  маем  $\sin \varphi = \varphi = k \lambda / b = h / (b m v)$ . Тады  $x = 2 a k h$   $x (b m v)^{-1} = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ . 32.16.

$$\Delta x = \frac{2\pi\hbar l}{d \sqrt{2 m e \Delta \varphi}} = 4,5 \text{ мкм.}$$

32.17.  $E_k = m c^2 (\sqrt{2} - 1) = 0,212 \text{ МэВ}$ .

32.18.  $v = h / (m \lambda) = k h / (2 d m \sin \varphi) = 2,02 \text{ Мм/с}$ . 32.19.

$$\Delta\varphi = \frac{E_k}{e} = \frac{h^2}{2me\lambda^2} = \frac{k^2 h^2}{2med^2 \sin^2\varphi} = 15,2 \text{ кВ.}$$

32.20.  $\Delta x \geq \hbar / (m\Delta v)$ ;  $\Delta x \geq 11,6 \cdot 10^{-7}$  м. 32.21.  $\Delta x \geq \hbar / \sqrt{3mkT}$ ;  $\Delta x \geq 16,4 \times 10^{-12}$  м. 32.22.  $\Delta v \geq \hbar / (m\Delta x)$ ;  $\Delta v \geq 1,2 \cdot 10^6$  м/с;  $\Delta v/v_1 \geq 0,27$  (гл. рашэнне задач 33.3 і 33.5). 32.23.  $\lambda = 2\pi\hbar / p \approx 4\pi\Delta x$ ;  $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-9}$  м. 32.24.  $\Delta E \geq \hbar / \Delta t$ ;  $\Delta E \geq 6,6 \cdot 10^{-9}$  эВ. 32.25.  $1,31 \cdot 10^{-23}$  с. 32.26. Выкарыстаўшы  $p = \sqrt{2m \langle E_k \rangle}$  і  $\Delta p_x \approx p$ , маем  $\langle E_k \rangle \geq \hbar^2 / (2m\Delta x^2)$ ;  $\langle E_k \rangle \geq 0,25$  эВ. 32.27. Для першай бо-раўскай арбіты  $\Delta r \ll r$ , дзе  $r = \hbar^2 / (me^2)$  — радыус гэтай арбіты, а  $\Delta r$  — яго нявызначанасць. Нявызначанасць імпульсу  $\Delta p \approx \hbar / (2r) \gg \hbar / r = me^2 / \hbar$ . Гэта больш за імпульс электрона  $p = me^2 / \hbar$ . 32.30. Пры  $x < 0$  і  $x > a$   $\psi(0) = 0$ .

$$E_n = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2,$$

дзе  $n = 1, 2, 3, \dots$  Для  $n = 1$   $E_1 = 0,38$  эВ. 32.31.  $\Delta E = E_2 - E_1 = 3\pi^2 \hbar^2 / (2ma^2)$ . 32.32.

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ma^2} n^2, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right).$$

32.33. Для  $0 \leq x \leq a$   $\partial^2 \psi_1 / \partial x^2 + k^2 \psi_1 = 0$  ( $k^2 = 2m_0 E / \hbar^2$ ); для  $x > 0$   $\partial^2 \psi_2 / \partial x^2 - d^2 \psi_2 = 0$  ( $d^2 = 2m_0 (V_0 - E) / \hbar^2$ ). Рашэнні:  $\psi_1(x) = A \sin kx$ ;  $\psi_2(x) = B e^{-dx}$ . У пункце  $x = a$  атрымаем:  $A \sin ka = B e^{-da}$ ;  $A \cos ka = -B d e^{-da}$ . Тады  $\operatorname{tg} ka = -k / d$ , або

$$\sin ka = \pm \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m_0 a^2 v_0}} ka.$$

32.34.

$$U(x) = \begin{cases} 0 & \text{пры } 0 \leq x \leq a_1; \\ U_0 & \text{пры } a_1 \leq x \leq a_2; \\ \infty & \text{пры } x = 0 \text{ і } x = a_2. \end{cases}$$

Для  $x < 0$  і  $x > a_2$   $\psi_x = 0$ ; у пунктах  $x = 0$  і  $x = a_2$   $\psi(0) = 0$  і  $\psi(a_2) = 0$ . Для  $0 \leq x \leq a_1$   $\psi_1'' = -k^2 \psi_1$ , а для  $a_1 \leq x \leq a_2$   $\psi_2'' = -\kappa^2 \psi_2$ , дзе  $k^2 = 2mE / \hbar^2$  і  $\kappa^2 = 2m(E - U_0) / \hbar^2$ . Рашэнне  $\psi = e^{ax}$ .  $\psi_1(x) = A_1 e^{ikx} + B_1 e^{-ikx}$  і  $\psi_2(x) = A_2 e^{i\kappa x} +$

+  $B_2 e^{-i\kappa x}$ . Калі  $B_1 = -A_1$  і  $B_2 = -A_2$ , то:  $A_1 (e^{ika_1} - e^{-ika_1}) = A_2 (e^{i\kappa a_1} - e^{-i\kappa a_1})$ ;

$kA_1 (e^{ika_1} + e^{-ika_1}) = \kappa A_2 (e^{i\kappa a_1} + e^{-i\kappa a_1})$ , адкуль

$$\frac{1}{k} \operatorname{tg} ka_1 = \frac{1}{\kappa} \operatorname{tg} \kappa a_1.$$

Гэта і ёсць шукаемае ўраўненне

$$\sqrt{1 - \frac{2mU_0}{k^2 \hbar^2}} \operatorname{tg} ka_1 = \operatorname{tg} \left( a_1 \sqrt{k^2 - \frac{2mU_0}{\hbar^2}} \right).$$

32.35.

$$R = \left( \frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2} \right)^2, \text{ дзе } K_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar};$$

$$K_2 = \frac{\sqrt{2m(E - U)}}{\hbar}. \text{ Тады}$$

$$R = \left( \frac{\sqrt{E} - \sqrt{E - U}}{\sqrt{E} + \sqrt{E - U}} \right)^2 = 0,005; D = 1 - R = 0,995.$$

$$33.1. E_{\text{св}} = \hbar R / \left( \sqrt{R \lambda_1 \lambda_2 / (2\pi c \Delta \lambda)} - 1 \right)^2 = 5,3 \text{ эВ. } 33.2.$$

$$\nu = \frac{e}{2\pi} \sqrt{1 / (m_e r^3)} = 5,14 \text{ МГц}$$

( $r$  — радыус атама Томсана). 33.3. З формулы  $m\nu_k^2 / r_k = e^2 / (4\pi\epsilon_0 r_k^2)$  маем:

$\nu_k^2 = e^2 / (4\pi m r_k \epsilon_0)$ . Тады  $\nu_k = e^2 / (2k\epsilon_0 h)$ , або  $\nu_k = 2,188/k$  Мм/с. Пры  $k = 1$

$\nu_1 = 2,19$  Мм/с, пры  $k = 2$   $\nu_2 = 1,09$  Мм/с. 33.4.

$$r_{\min} = \frac{q_1 q_2}{E_k} \left( 1 + \frac{m_\alpha}{m_{\text{Li}}} \right) = 3,4 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$$

33.5.

$$\lambda = \frac{8\pi^2 \hbar^2 \epsilon_0}{Ze^2 m} n = 667 \text{ пм}$$

(гл. рашэнне задачы 33.3). 33.6.

$$r_k = \frac{\epsilon_0 h^2 k^2}{\pi m e^2}, \text{ або } r_k = k^2 \cdot 53,1 \text{ пм}$$

(гл. рашэнне задачы 33.3). Пры  $k = 1$   $r_1 = 53,1$  пм, пры  $k = 2$   $r_2 \approx 212,4$  пм.



33.7. Ведаючы  $v_k$  (гл. рашэнне задачы 33.3) і  $r_k$  (гл. рашэнне задачы 33.5), магчыма знайсці  $a_k = v_k^2/r_k = \pi m e^6 / (4\epsilon_0^3 k^4 h^4)$ , або  $a_k \approx 9,0 \cdot 10^{22} / n^4$  м/с<sup>2</sup>. Пры  $k=1$   $a_1 = 9,0 \cdot 10^{22}$  м/с<sup>2</sup>, пры  $k=2$   $a_2 = 0,56 \cdot 10^{22}$  м/с<sup>2</sup>. Такое надзвычай вялікае паскарэнне электронаў павінна суправаджацца моцным электрамагнітным выпраменьваннем. У выніку энергія электронаў будзе вельмі хутка змяншацца і электроны павінны ўпасці на ядро. Такім чынам, атам Рэзерфорда аказваецца няўстойлівым, час яго жыцця складае ўсяго некалькі доляў секунды. У гэтым і заключаецца адзін з недахопаў мадэлі Рэзерфорда. 33.8.  $k = e^2 / (2\epsilon_0 h v_k) = 3$ . 33.9. Пры  $k=1$  81,7 нН, 511 ГВ/м; пры  $k=2$  5,11 нН, 31,9 ГВ/м. 33.10.

$$n = \frac{1}{\sqrt{1 - E/(chR)}} = 3; \quad \frac{r_3}{r_1} = \left(\frac{n}{k}\right)^2 = 9 \text{ разоў.}$$

33.11.  $h\nu - h\nu' = m v'^2/2$  і  $m v' + h\nu'/c = 0$ , дзе  $\nu'$  — частата рассеянага фатона;  $v'$  — скорасць атама пасля выпраменьвання фатона. Адкуль

$$h(\nu - \nu') = \frac{h^2}{2mc^2} \nu'^2; \quad \frac{\Delta\nu}{\nu'^2}, \quad \frac{\Delta\nu}{\nu'^2} = \frac{h}{2mc^2},$$

або  $\Delta\nu = \Delta(c/\nu) = c\Delta(1/\nu) = c\Delta\nu/\nu^2 = h/(2mc) = 2$  фм. 33.12.

$$m_0 c^2 + \hbar\omega = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \frac{\hbar\omega}{c} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Адкуль

$$v = c \frac{\hbar\omega}{m_0 c + \hbar\omega} = \frac{1}{m_0 c} \frac{\hbar\omega}{1 + \hbar\omega/(m_0 c^2)} \approx \frac{\hbar\omega}{m_0 c} \left(1 - \frac{\hbar\omega}{m_0 c^2}\right).$$

33.13.

$$r_n = \frac{\epsilon_0 \hbar^2 \lambda R k^2}{\pi m e (R\lambda - k^2)} = 475 \text{ пм.}$$

33.14.

$$E = E_n - E_k = \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) = 10,2 \text{ эВ.}$$

33.15. Гелій: 54 эВ і 54 В; ліцій: 122 эВ і 122 В. 33.16.  $E = E_k + E_n$ . Знайдзем

$$E_n = \int_{\infty}^{r_k} F dr = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \int_{\infty}^{r_k} \frac{dr}{r^2} = - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_k} =$$

$$= - \frac{me^4}{4k^2 \varepsilon_0^2 h^2}, \text{ або } E_n = \frac{27,1 \text{ эВ}}{k^2};$$

$$E_k = \frac{mv_k^2}{2} = \frac{me^4}{8k^2 \varepsilon_0^2 h^2}, \text{ або } E_k = \frac{13,6 \text{ эВ}}{k^2}.$$

$$\text{Тады } E = E_k + E_n = \frac{me^4}{8k^2 \varepsilon_0^2 h^2}, \text{ або } E = - \frac{13,5 \text{ эВ}}{k^2}.$$

33.17.  $mv_k r_k = kh / (2\pi)$ , адкуль  $2\pi r_k = kh / (mv_k) = k\lambda$ ;  $\lambda_1 = 332 \text{ нм}$  і  $\lambda_2 = 996 \text{ нм}$ ;  $2\pi r_1 = 332 \text{ нм} = \lambda_1$  і  $2\pi r_3 = 996 \text{ нм}$  (гл. рашэнне задач 33.3 і 33.5). Гэта значыць, што атрымліваюцца стацыянарныя электронныя арбіты, уздоўж якіх складаецца цэлая колькасць даўжынь хваляў дэ Бройля. У квантава-механічнай мадэлі атама на змену бораўскім арбітам прыйшлі прасторавыя стаячыя хвалі. Кожнай з такіх хваляў адпавядаюць пэўная энергія і асабістая частата. Замест пераходу з адной арбіты на другую адбываецца пераход з аднаго стану (якому адпавядае пэўная прасторавая стаячая хваля) у другі.

33.18.  $121,2 - 90,9 \text{ нм}$ . 33.19.  $v = 3\pi \hbar R / (2m) = 3,25 \text{ м/с}$ , дзе  $m$  — маса атама.

33.20.  $v = \sqrt{8\pi \hbar c R / m_0} = 3,1 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ , дзе  $m_0$  — маса электрона. 33.21.

$$p_a = p = \frac{h}{\lambda} \quad E = \frac{p_a^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{2m\lambda^2};$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right). \text{ Тады}$$

$$E = \frac{h^2 R^2}{2m} \left( \frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)^2 = 91 \text{ нэВ}.$$

33.22.  $2,2 \text{ аДж}$ . 33.23.  $654,5 \text{ нм}$ ;  $484,8 \text{ нм}$ ;  $432,9 \text{ нм}$ . 33.24.  $\lambda = (d \sin \varphi) / k = 6,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  (бачная частка спектра).  $1/\lambda = R (1/k^2 - 1/n^2)$ . Адкуль

$$n = \frac{1}{\sqrt{1/k^2 - 1/(R\lambda)}} = 3.$$

Выпускаемая спектральная лінія адпавядае пераходу электрона з трэцяга энергетычнага ўзроўню на другі. 33.25.  $1,002 \text{ мкм}$ . 33.26.  $1,095 \text{ м}^{-1}$ . 33.27. Серыям Лаймана і Бальмера адпавядаюць лікі  $k$ , роўныя адпаведна 1 і 2. Найбольшая даўжыня хвалі ў кожнай серыі адпавядае ліку  $n = k + 1$ . Таму

$$\frac{1}{\lambda_1} = R \left[ \frac{1}{k_1^2} - \frac{1}{(k_1 + 1)^2} \right];$$

$$\frac{1}{\lambda_2} = R \left[ \frac{1}{k_2^2} - \frac{1}{(k_2 + 1)^2} \right].$$

Адкуль

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{1/k_1^2 - 1/(k_1 + 1)^2}{1/k_2^2 - 1/(k_2 + 1)^2} = 656,6 \text{ нм.}$$

33.28.  $\lambda = hc / \Delta E = 656,6 \text{ нм.}$  33.29.  $A = hRc / k^2 = 5,47 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,42 \text{ эВ.}$

33.30.  $\lambda_{1,2} = 121,6 \text{ нм; } \lambda_{1,3} = 102,6 \text{ нм; } \lambda_{2,3} = 656,3 \text{ нм.}$  33.31.

$$-\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} \leq -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} + E. \text{ Адкуль}$$

$$n \leq \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{8\epsilon_0^2 h^2 E}{me^4}}}; \quad n = 5.$$

Паколькі  $\lambda = 1/[R(1/k^2 - 1/n^2)]$ , то  $\lambda_{2,3} = 656,3 \text{ нм; } \lambda_{2,4} = 484,8 \text{ нм; } \lambda_{2,5} = 434,0 \text{ нм.}$  33.32.

$$n \leq \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{8\epsilon_0^2 h^3 c}{me^4 \lambda}}};$$

$n = 3; \lambda_{1,2} = 121,6 \text{ нм; } \lambda_{1,3} = 102,6 \text{ нм; } \lambda_{2,3} = 656,3 \text{ нм.}$  33.33. Калі ёсць два (1 і 2) невыраджальныя ўзроўні ў сценах поласці, тады адносіна інтэнсіўнасці індцыраванага да інтэнсіўнасці спантаннага выпраменьвання

$$s = \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}.$$

Калі па Эйнштэйну (тэорыя выпраменьвання)  $e^{h\nu/(kT)} \leq 2$ , тады  $\lambda \geq hc/(kT \ln 2)$ , або  $\lambda \geq 72 \text{ мкм.}$  33.34. 1) 0,1; 2) 1/2, 3/2; 3) 0, 1, 2. 33.35.

Колькасць слаёў 6, абалонак 12, электронаў у сляях 2, 8, 18, 18, 8, 1, у абалонках 2, 2, 6, 2, 6, 10, 2, 6, 10, 2, 6, 1; агульная колькасць электронаў 55.

33.36.  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^5.$  33.37.  $\Delta\lambda_0 = \mu_0 e \lambda^2 H / (4\pi m_0 c) = 0,23 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$

33.38.  $H = \Delta\lambda_0 / \lambda = 4\pi m_e c / (\mu_0 e \lambda) \approx 3,05 \cdot 10^{10} \text{ А/м.}$  33.39.  $-1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$

33.40.  $p_m = eh / (4\pi mc) = 0,92 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Гс.}$  33.41.  $\mu_N / \mu_B = m_e / m_p = 1/1836.$

33.42.  $I = N / (St) = E\lambda / (Shct) = 1,1 \cdot 10^{26} \text{ А/м}^2; p_c = \langle f \rangle / S = [p_\gamma (1 + \rho) \Delta N] / S \Delta t =$

$= h\nu(1 + \rho) / \lambda = 0,16 \text{ Па.}$  34.1.  $a = \sqrt[3]{M / (2N_A \rho)} = 0,2814 \text{ нм.}$  34.2.

$$a^3 = V = \frac{V_m}{Z_m} = \frac{M}{\rho} \frac{n}{N_A}.$$

Адкуль  $a = \sqrt[3]{nM / (\rho N_A)} = 556 \text{ пм; } d = a / \sqrt{2} = 393 \text{ пм.}$  34.3.  $a = \sqrt[3]{2Am_H / \rho} =$

$= 5,35 \cdot 10^{-10} \text{ м}$  ( $A$  — атамная маса,  $m_H$  — маса атама вадароду). 34.4. Ni.



34.5.  $j = I/S = nev_d$ , адкуль  $v_d = I/(neS) = 0,3 \text{ нА/см}^2$ . 34.6.  $v_d = bE = E/ner = 0,68 \text{ м/с}$ . 34.7.  $\sigma = ne^2 \tau/m$ , дзе  $n = N_A \rho_1 / M$ . Тады  $\tau = mM / (N_A \rho_1 e^2) = 0,26 \cdot 10^{-13} \text{ с}$ . 34.8.  $4,3 \cdot 10^{-15} \text{ с}$ ;  $6,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ;  $7,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$ . 34.9. 8,8 %, 39 %. 34.10.  $\rho_p = 1/(n_p e b_p) = 0,12 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $\rho_n = 1/(n_n e b_n) = 0,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ . 34.11.  $n = 1/[\rho e(b_n + b_p)] = 2,37 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . 34.12.  $\lambda = hc/\Delta E = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . 34.13.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{\exp(-\Delta E/2kT_2)}{\exp(-\Delta E/2kT_1)} = \exp\left[\frac{\Delta E (T_2 - T_1)}{2kT_1 T_2}\right] = 17,5 \text{ раза.}$$

34.14.  $\rho = 1/\gamma = \rho_\infty e^{\Delta E/(kT)}$ , дзе  $\rho_\infty = 1/\gamma_0$  — удзельнае супраціўленне пры  $T \rightarrow \infty$ . 34.15.

$$\Delta E = 2k \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{R_1}{R_2}.$$

34.16.

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dT} &= R_\infty e^{\Delta E/(2kT)} \frac{\Delta E}{2k} \left(-\frac{1}{T^2}\right) = \\ &= -R \frac{\Delta E}{2k} \frac{1}{T^2} = \alpha R. \text{ Адкуль } \alpha = -\frac{\Delta E}{2k} \frac{1}{T^2}. \end{aligned}$$

34.17.  $\alpha = -0,097 \text{ К}^{-1}$ . 34.18. 0,74 эВ. 34.19.  $n_n \approx n_d \sim T^{3/2} \exp(-\Delta E/(2kT))$ .

Тады

$$\frac{n'_n}{n_n} = \frac{n'_d}{n_d} = \left[\frac{T_2}{T_1}\right]^{3/2} \exp\left[\frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right] = 3,67 \text{ раза.}$$

34.20. Для германію сурма з'яўляецца донарам, а індый — акцэптарам.

Тады  $\sigma = n_n e b_n + n_p e b_p = 350 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ . 34.21.  $Q = \lambda (dT/dx) S \Delta t = 1,32 \text{ МДж}$ .

34.22.  $kT \gg \hbar\omega$ ,  $e^{\hbar\omega/(kT)} \approx 1 + \hbar\omega/(kT)$ . Тады  $C \approx 3R$ . 34.23.  $kT \ll \hbar\omega$ ,

$\exp[\hbar\omega/(kT)] \gg 1$ . Тады  $C = 3R(\theta_E/T)^2 \exp(-\theta_E/T)$ . 34.24.  $C = 0,92 \cdot 3R$ .

34.25. 3 кДж/моль. 34.26.

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{M_1}{M_2} \left[\frac{\theta'_d}{\theta''_d}\right]^3 = 1,4 \text{ раза.}$$

34.27. Пры  $T \gg \theta_d$   $\hbar\omega/(kT) \gg 1$ ,  $e^{\hbar\omega/(kT)} \approx 1 + \hbar\omega/(kT)$ . Тады  $U = U_0 + 3RT$

і  $C = 3R$ . 34.28. Пры  $T \ll \theta_d$   $x_m = \hbar\omega/(kT) \approx \infty$  і

$$\int_0^\infty \frac{e^x x^4 dx}{(e^x - 1)^2} = \frac{4}{15} \pi^4. \text{ Тады } C = \frac{12\pi^4}{5} R \left(\frac{T}{\theta_d}\right)^3.$$

34.29.

$$C = \frac{12\pi^4}{5} R \left( \frac{T}{\theta_D} \right)^3 = 21,3 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}.$$

34.30.  $\theta_E = \hbar\omega / k = \hbar\nu / k$ , дзе  $\nu = \omega / (2\pi) = (1/2\pi)\sqrt{k_1/m}$  ( $\nu$  — уласная частата хваляў атама,  $m$  — маса атама). Тады  $k_1 = 4\pi^2 m k^2 \theta_E^2 / \hbar^2 = 180 \text{ кг/с}^2$ .

34.31. Пры  $E = b = 0,1 \text{ эВ}$   $f(E) = 2,05 \cdot 10^{-2}$ . 34.32. Пры  $E = b$   $f(E) = 0,5$ . 34.33.

$E_F = [\hbar^2 / (2m)] (3\pi^2 N_A \rho / M)^{2/3} = 2,05 \text{ эВ}$ . 34.34.  $\Delta p_x \approx \hbar / 2m \approx 31,4 \cdot 10^{-19} \text{ Н} \cdot \text{с}$ .

$\langle E \rangle = 3(\Delta p_x)^2 / (2m)$ . Сярэдняя энергія павінна быць некалькі большая за атрыманае значэнне. Таму пры  $kT \ll E_F$

$$\langle E \rangle = \frac{3}{5} E_F = \frac{3}{5} \frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{3\pi^2 n}{V} \right)^{2/3} \approx 17 \text{ МэВ}.$$

34.35.

$$N_\ominus = nV = \frac{E_F^{3/2} (2m)^{3/2} V}{3\pi^2 \hbar^3} \quad \text{і} \quad N_a = \frac{m}{M} N_A = \frac{\rho V}{M} N_A. \quad \text{Тады}$$

$$\frac{N_\ominus}{N_a} = \frac{E_F^{3/2} (2m)^{3/2} M}{3\pi^2 \hbar^3 \rho_1 N_A} = 1.$$

34.36.

$$\langle E \rangle = \frac{3\hbar^2}{10m} (3\pi^2 n)^{2/3} = 0,14 \text{ эВ}.$$

34.37.  $v_{\max} = \sqrt{2E_F/m} = 1,33 \text{ Мм/с}$ . 34.38.  $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{3/5} v_{\max} = 1,03 \text{ Мм/с}$ .

34.39. З формулы  $mv_F^2/2 = E_F$  маем:  $\langle v_F \rangle = \sqrt{\hbar^2 (3\pi^2 n)^{2/3} / m^2} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ .

34.40. Пры  $T = 2 \text{ К}$   $C_V = 42 \text{ Дж/(К} \cdot \text{м}^3)$ , а пры  $T = 1000 \text{ К}$   $C_V = 21 \text{ кДж/(К} \cdot \text{м}^3)$ .

34.41.  $n = N_A / V = N_A \rho_1 / A$ ;

$$C_V = \frac{\pi^2}{2} \frac{k^2}{E_F} \frac{N_A}{A} \rho_1 T = 13,7 \text{ кДж/(К} \cdot \text{м}^3).$$

34.42.  $\gamma_\phi = e(u_n + u_p)\Delta n$ ;

$$\gamma_\phi = \gamma - \gamma_0 = \frac{(\rho_0 - \rho) l^2 / S^2}{\rho \rho_0 l^2 / S^2} = \frac{(R_0 - R) l / S}{RR_0} = \frac{R_0 - R}{RR_0 e};$$

$$\Delta n = \frac{R_0 - R}{e(u_n + u_p) RR_0 l}.$$

35.1.  $m = pVM/(RT) = 0,2$  мг. 35.2.  $T_2 = T_1 k^{1-\gamma} = 321$  К. 35.3.  $S = \rho_1/\rho_2 = m_1 V_2/(m_2 V_1)$ ;  $p_1 V_1 = m_1 RT_1/M$ ;  $p_2 V_2 \approx m_2 RT_2/M$ ;  $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$ .

Тады

$$S = \frac{p_1}{p_2} \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = \frac{p_1}{p_2} k^{1-\gamma}.$$

35.4.  $r_{\text{кр}} = 2\gamma(p_n - p_{\text{ж}}) = 4 \cdot 10^{-9}$  м. 35.5.  $E = pc \approx 600$  МэВ. 35.6. Радыус  $r$  знойдзем з формулы

$$E_k = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{[eBr/(m_0 c)]^2}{1 + [eBr/(m_0 c)]^2}}}.$$

Адносіну  $v/c$  знойдзем з выразу  $p = m_0 c \beta \sqrt{1 - \beta^2}$  ( $p = eBr$  знаходзім з формулы  $mv/r = eBv$ ). Радыус  $r = 10$  см. 35.7.  $B = mv/(Qr)$ . Імпульс часцінкі  $p = mv$  і яе кінетычная энергія  $E_k$  звязаны выразам

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E_k(E_k + 2m_0 c^2)},$$

$$\text{тады } B = \frac{1}{cqr} \sqrt{E_k(E_k + 2m_0 c^2)},$$

дзе  $E_k = (h\nu - 2m_0 c^2)/2 = 2,50$  МэВ.  $B = 0,28$  Тл. 35.8. У 11,6 раза. 35.9. З памяншэннем скорасці часцінкі павялічваюцца яе іанізацыйныя траты. Такім чынам, колькасць зярнатак на адзінку даўжыні следу павялічваецца ў напрамку руху часцінкі. 35.10. З формул  $A = enU$  і  $E_k = mc^2 - m_0 c^2$  знаходзім:  $n = (mc^2 - m_0 c^2)/(2eU) = 0,05m_0 c^2/(2eU) = 784$  абароты. 35.11. Сярэдні шлях касмічных часцінак у камеры  $2\pi/d$ . Тады 1 часцінка стварае  $\sim 306$  пар іонаў. Колькасць пар іонаў, якія ствараюцца ў камеры,  $N = Q/e = \Delta\varphi_0 c/e = 1,25 \cdot 10^7$ .

Тады  $1,25 \cdot 10^7/306 = 4,1 \cdot 10^4$  часцінак. 35.12. 1) 6 пратонаў і 4 нейтроны; 2) 6 пратонаў і 5 нейтронаў; 3) 6 пратонаў і 6 нейтронаў; 4) 6 пратонаў і 7 нейтронаў; 5) 6 пратонаў і 8 нейтронаў; 6) 6 пратонаў і 9 нейтронаў. 35.13.

У 6,2 раза. 35.14.  $\sigma = \pi R^2 = \pi R_0^2 A^{2/3}$ ;  $\sigma_1/\sigma_2 = (A_1/A_2)^{2/3} = 7,1$ . 35.15.  $\rho = Am_p/V = 2,15 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>. 35.16.  $R = R_c \sqrt[3]{\rho_c/\rho_{\text{я}}} = 12,2$  км (гл. задачу 35.15).

35.17. 76,3 МэВ. 35.18. 2,01650 а.а.м.; 2,01414 а.а.м. 35.19. 8,5 МэВ; 7,7 МэВ. Ядро  ${}^3_1\text{H}$  больш устойлівае, чым  ${}^3_2\text{He}$ . 35.20. 1778,6 МэВ; 1798,9 МэВ.

Удзельная энергія сувязі ў  ${}^{235}_{92}\text{U}$  — 7,57 МэВ, а ў  ${}^{238}_{92}\text{U}$  — 7,58 МэВ. 35.21. 6,47 МэВ. 35.22. 1,12 МэВ; 8,80 МэВ; 8,43 МэВ; 7,56 МэВ. 35.23.  $E = (\epsilon m N_A t \ln 2)/(MT) = 120$  кДж, дзе  $M$  і  $T$  — малярная маса і перыяд



паўраспаду  ${}_{83}^{210}\text{Bi}$  адпаведна. 35.24. 707 атамаў. 35.25.  $1,66 \cdot 10^9$ . 35.26.  $1,4 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$ ; 0,74. 35.27.

$$t = \frac{T}{\ln 2} \ln \frac{1}{1 - \Delta n} = 276 \text{ сут.}$$

35.28. 2 сут. 35.29.  $T = N_0 \Delta t \ln 2 / (A \Delta N) = 5,02 \text{ сут.}$  35.30.

$$\Delta N = \frac{m N_A \ln 2}{A T} \Delta t = 1,68 \cdot 10^{15} \text{ распадаў/с;}$$

$$N = m \frac{N_A}{A} \exp(-\lambda t) = 1,19 \cdot 10^{22} \text{ атамаў.}$$

35.31.  $\Delta N = m N \Delta t \ln 2 / (A T) = 410 \text{ часцінак/с.}$  35.32. За 1 гадз. выдзяляецца энергія  $E = 70,6 \text{ ТэВ.}$  Павышэнне тэмпературы каларыметра  $\Delta T = E/C = 2,7 \text{ К.}$  35.33. З адносін

$$\Delta N = \frac{\ln 2}{T} N \Delta T, \quad \Delta N = n \frac{4\pi r^2}{S}, \quad \frac{m}{N} = \frac{A_0}{N_A}$$

знаходзім  $n = \frac{N_A S \Delta t \ln 2}{4\pi r^2 A T} = 94.$

35.34.

$$m = \frac{4\pi n l^2 M T}{N_A S t \ln 2} = 6,5 \cdot 10^{-13} \text{ кг.}$$

35.35.

$$V = V_1 \frac{a_0}{a} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T} t\right)^3 = 5907 \text{ см.}$$

35.36.

$$M_{\text{св}} = \frac{A_{\text{св}} M_{\text{тор}}}{A_{\text{тор}}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{\text{тор}}} t\right)\right] = 17,5 \text{ г.}$$

35.37. 6; 4. 35.38. 8; 6. 35.39.  $e^+$ . 35.40.  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ . 35.41.  ${}_{92}^{239}\text{U}$ . 35.42.  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ . 35.43.

$$E = N \frac{m v^2}{2} \left(1 + \frac{m_a}{A}\right) t = 100 \text{ Дж.}$$

35.44.  $a_0 = \lambda N_0 = (N_0 \ln 2) / T$ , дзе  $N_0$  — колькасць атамаў у пачатковы момант ( $t = 0$ ). Тады  $a = a_0 e^{-\lambda t} = 32,4 \text{ мКл.}$  35.45.  $4,1 \cdot 10^3 \text{ гадоў.}$  35.46.  $10^6 \text{ атамаў.}$

35.47.

$$a_0 = \frac{\ln 2}{T} \frac{m}{M} N_A = 12,6 \cdot 10^{17} \text{ распадаў/с;}$$

$$a = a_0 (e^{\ln 2})^{-t/T} = \frac{a_0}{2^{t/T}} = 3,4 \cdot 10^7 \text{ Кы.}$$

35.48.

$$\Delta N = \frac{N \ln 2}{T} \Delta t = \frac{m N_A \Delta t \ln 2}{AT} = 1,24 \cdot 10^7 \text{ распадаў/с;}$$

$$a = \frac{1,24 \cdot 10^7}{3,7 \cdot 10^{10}} = 0,34 \text{ мКы.}$$

35.49.  $f = 1 - e^{-\mu d}$  ( $d$  — таўшчыня лічыльніка;  $\mu$  — каэфіцыент паглынання  $\gamma$ -квантаў у крышталі). 35.50.  $m_2 = m_1 M_2 T_2 / (M_1 T_1) = 2 \text{ г } 12 \text{ мг}$ , дзе  $M_1$  і  $T_1$  — малярная маса і перыяд паўраспаду  ${}^{32}_{15}\text{P}$ ;  $M_2$  і  $T_2$  — тое самае для  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ .

35.51.  $0,13 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}^2$ . 35.52.  ${}^7_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ({}^9_9\text{F}) \rightarrow {}^8_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$ . Паглынаецца энергія 1,20 МэВ. 35.53. 1,56 МэВ. 35.54.  ${}^9_4\text{Be} + {}^2_1\text{H} \rightarrow ({}^{11}_5\text{B}) \rightarrow {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$ ;

4,36 МэВ. 35.55. 17,9 МэВ. 35.56.  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$ ; 18,14 МэВ. 35.57. 9,2 МэВ.

35.58. 1,56 МэВ; 7,28 МэВ. 35.59. 0,78 МэВ. 35.60. 17,6 МэВ; 4,0 МэВ; 4,8 МэВ; 5,02 МэВ. 35.61.

${}^5_5\text{B} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^7_7\text{N} \rightarrow {}^7_7\text{N} + {}^1_0\text{n}$ ;

${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ({}^{31}_{15}\text{P}) \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$ ;

${}^{24}_{12}\text{Mg} + {}^4_2\text{He} \rightarrow ({}^{28}_{14}\text{Si}) \rightarrow {}^{27}_{14}\text{Si} + {}^1_0\text{n}$ .

35.62.  ${}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$ ; 2,79 МэВ. 35.63. 0,25. 35.64.  ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$ ;

${}^{30}_{15}\text{P} \rightarrow {}^{30}_{14}\text{Si} + {}^0_1\text{e}$ ; 1,08 МэВ. 35.65. 234,04643 а.е.м. 35.66. Энергія, якая вылучаецца пры ўтварэнні аднаго ядра гелію, 27,3 МэВ. У геліі масай 1 г змяшчаецца  $N_A / A = 1,506 \cdot 10^{23}$  атамаў. Такім чынам, энергія, якая вылучаецца пры ўтварэнні гелію масай 1 г, роўная  $41,1 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 658 \text{ ГДж}$ .

35.67.  $5,13 \cdot 10^{23} \text{ МэВ} = 82 \text{ ГДж}$ . 35.68.  $8,2 \cdot 10^{13} \text{ Дж} = 5,12 \cdot 10^{32} \text{ эВ}$ ;  $2,8 \cdot 10^6 \text{ кг}$ ;  $1,67 \cdot 10^9 \text{ кг}$ . 35.69.  $1,54 \cdot 10^6 \text{ кг}$ . 35.70.  ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{139}_{54}\text{Xe} + {}^{95}_{38}\text{Sr} + 2 {}^1_0\text{n}$ . 35.71.

9,8 МэВ. 35.72. 30 г. 36.73.  $m = nM / N_A = NMt / (EN_A) = 44 \text{ г}$ . 35.74.

$N_{\text{Эл}} = \eta N = \eta \frac{W}{t} = \eta \frac{m N_A E}{Mt} = 15,2 \text{ МВт}$ .

35.75.  $m = 1,5nM / N_A = 1,5NMt / (EN_A) = 0,71 \text{ кг}$ . 36.1. 0,4 і 9 ГэВ. 36.2.

Няхай фатон перадае электрону сваю энергію. Тады  $hw + m_0 c^2 = \sqrt{p_3^2 c^2 + m_0^2 c^4}$ .

Адкуль

$$p_{\nu} = \frac{\hbar\nu}{c} \sqrt{1 + 2 \frac{m_0 c^2}{\hbar\nu}} = p_{\nu'} \sqrt{1 + \frac{2m_0 c^2}{\hbar\nu}} > p_{\nu'} ,$$

што прычыць закону захавання імпульсу. 36.3.  $E^2 - p^2 c^2 = E'^2 - p'^2 c^2$ . Да сутыкнення  $E = E_1 + E_2 = E_k + E_0 + E_0 = E_k + 2E_0$ ,  $p = p_1$ ,  $p_2 = 0$ . Пасля сутык-

нення  $E' = E'_0$ ,  $p' = 0$ . Улічваючы, што  $p_1 = (1/c) \sqrt{(2E_0 + E_k) E_k}$  (гл. рашэнне

задачы 7.19), атрымаем  $(3E_0)^2 - 3E_0^2 = m_0^2 c^4$ , адкуль  $m'_0 = \sqrt{6} m_0$ . 36.4.  $E_{\text{пар}} =$

$= 4m_e c^2 = 2,04 \text{ МэВ}$ . 36.5. Забаронены рэакцыі 2 і 4, таму што не захоўваецца

лептонны зарад, і забаронена рэакцыя 8, таму што не захоўваецца барыён-

ны зарад; у рэакцыі 2 парушаецца яшчэ закон захавання энергіі. 36.6.  $S =$

$= -2$ ,  $Y = -1$ , нейтральны ксі-гіперон. 36.7.  $E_{\pi} + m_p = E_{k\Sigma}$ ;  $p_{\pi} = p_{k\Sigma}$ ;

$$E_{\pi \text{ пар}} = \frac{(m_k + m_{\Sigma})^2 - (m_{\pi} + m_p)^2}{2m_p} = 905 \text{ МэВ}.$$

36.8. 2,76 МэВ. 36.9.  $(E + m_1 c^2)^2 - p^2 c^2 = (m_1 + 2m)^2 c^4$ , дзе  $p = E/c$  (пасля

ўзаемнага дзеяння канечныя часцінкі знаходзяцца ў стане спакою на пача-

так рэакцыі). Роўнасць выконваецца пры  $m_1 = 0$ . 36.10.  $p = (2E/c) \cos(\varphi/2)$

і  $E_k + 2 m c^2 = 2E$ , дзе  $p$  — імпульс пазітрона;  $m$  — яго маса;  $E$  — энергія

фатона;  $p_1 = p_2 = E/c$  — імпульс фатона. Для пазітрона  $(E_k + m c^2)^2 - p^2 c^2 =$

$= m^2 c^4$ . Тады  $\cos(\varphi/2) = 1 / \sqrt{1 + 2m c^2 / E_k} = 0,651$ ;  $\varphi = 98,5^\circ$ . 36.11. 750 кэВ;

1,65 пм. 36.12.  $p_1 + p_2 = p$ ;  $2m_e^2 c^2 + 2m_e E_e = m^2 c^2$ .  $E_e = (m^2 c^2 - 2m_e^2 c^2) / (2m_e) =$

$= 7m_e c^2 \approx 3 \text{ МэВ}$ , дзе  $m = 4m_e$ . 36.13.  $4 \cdot 10^{-22} \text{ Н}\cdot\text{с}$ . 36.14. З формул  $E_k = (E -$

$- 2m_0 c^2) / 2$  і  $E_k = m c^2 - m_0 c^2$  маем:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{(2m_0 c^2)^2}{E^2}} = 2,82 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

36.15.

$$\cos \frac{\theta}{2} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2m c^2 / E_k}} ; \quad \theta = 130^\circ .$$

36.16.  $\hbar\nu = 2m_0 c^2 + E_{e-} + E_{e+}$ . Адкуль  $E_{e-} + E_{e+} = \hbar\nu - 2m_0 c^2 = (3,02 -$

$- 1,02) \text{ МэВ} = 2,00 \text{ МэВ}$ . 36.17.  $1,2 \cdot 10^{38}$  атамаў. 36.18.  $m_0^2 c^4 = (E_1 + E_2)^2 -$

$- c^2 (p_1 + p_2)^2$ , дзе  $p_1 = E_1 / c$  і  $p_2 = E_2 / c$ . Тады  $m_0^2 c^4 = E_1^2 + 2E_1 E_2 + E_2^2 - E_1^2 -$

$- 2p_1 p_2 c^2 - E_2^2 = 2E_1 E_2 (1 - \cos \theta) \sin(\theta/2) = m_0^2 c^4 / (2\sqrt{E_1 E_2})$ . 36.19. 67,5 МэВ.



36.20. 0,78 МэВ. 36.21.

$$\tau_0 = \frac{l}{v} \sqrt{1 - v^2/c^2} = 2,1 \text{ мкс.}$$

36.22.

$$E_{kn} = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(m_\pi + E_k)} = 22 \text{ МэВ.}$$

36.23. 32 нс; 5,76 м. 36.24.

$$\langle l \rangle = c \langle \tau_0 \rangle \sqrt{\frac{\eta(\eta + 2)}{(\eta + 1)^2}} = 3,3 \text{ м.}$$

36.25.  $\tau_0 = lmc / \sqrt{E_k (E_k + 2m_0c)^2} = 1,73 \text{ нс.}$  36.26.

$$m = \sqrt{m_\Sigma^2 + m_\pi^2 - 2(m_\Sigma + E_{k_\pi})(m_\pi + E_{k_\pi})} =$$

$$= 9,4 \cdot 10^2 \text{ МэВ (нейтрон). 36.27.}$$

$$E_{k_n} = \frac{(m_\Sigma - m_n)^2 - m_\pi^2}{2m_\Sigma} = 19,5 \text{ МэВ.}$$

36.28.

$$v = c \sqrt{1 - \frac{1}{[E_k / (m_0c^2)]^2 + 1}} = 249 \text{ Мм/с.}$$

36.29. Калі

$$\frac{E}{m_0c^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1, \text{ то}$$

$$v = c \sqrt{1 - \left(\frac{m_0c^2}{E}\right)^2} = 2,60 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

36.30.  $E_n = \gamma m_n c^2 = (t/T) m_n c^2 \approx 4 \cdot 10^8 \text{ МэВ.}$  36.31. З формулы

$$eU = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

знаходзім  $v = 282 \text{ Мм/с.}$  36.32. Хвалі будуць распаўсюджвацца праз крышталі графіту, не расейваючыся пры  $\lambda > 2d$ . Таму павольныя нейтроны з імпульсам  $p < (h / (2d))$  не будуць адчуваць расейвання на атамах графіту і пройдуць праз стрыжань. Хуткія нейтроны з імпульсам  $p \geq (h / (2d))$  расейваюцца, пакінуць стрыжань і паглынуцца.

## ДАДАТАК

### 1. Асноўныя і дадатковыя адзінкі Міжнароднай сістэмы (СІ)

Велічыня	Адзінка	
	назва	абазначэнне
<i>Асноўныя адзінкі</i>		
Даўжыня	метр	м
Маса	кілаграм	кг
Час	секунда	с
Сіла электрычнага току	ампер	А
Тэрмадынамічная тэмпература	кельвін	К
Колькасць рэчыва	моль	моль
Сіла святла	кандэла	кд
<i>Дадатковыя адзінкі</i>		
Плоскі вугал	радыян	рад
Цялесны вугал	стэрадыян	ср

### 2. Некаторыя пазасістэмныя адзінкі

- 1 а.а.м. =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  кг
- 1 сярэдняя сонечныя суткі = 86400 с
- 1 год = 365,25 сут. =  $3,16 \cdot 10^7$  с
- 1 эВ =  $1,60 \cdot 10^{-19}$  Дж
- 1 атм = 101,3 кПа = 760 мм рт. сл.
- 1 бар = 100 кПа
- 1 мм рт. сл. = 133,3 Па
- 1 кюры =  $3,70 \cdot 10^{10}$  расп./с =  $3,70 \cdot 10^{10}$  Бк

### 3. Прыстаўкі і множнікі для ўтварэння дзесятковых кратных і дольных адзінак

Назва прыстаўкі	Абазначэнне прыстаўкі	Множнік	Назва множніка
экса	Э	$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{18}$	квінтыльён
пета	П	$1\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{15}$	квадрыльён
тэра	Т	$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	трыльён
гіга	Г	$1\,000\,000\,000 = 10^9$	мільярд
мега	М	$1\,000\,000 = 10^6$	мільён
кіла	к	$1\,000 = 10^3$	тысяча
гекта	г	$100 = 10^2$	сто
дэка	да	$10 = 10^1$	дзесяць
дэцы	д	$0,1 = 10^{-1}$	адна дзесятая
санты	с	$0,01 = 10^{-2}$	адна сотая
мілі	м	$0,001 = 10^{-3}$	адна тысячная
мікра	мк	$0,000001 = 10^{-6}$	адна мільённая
нана	н	$0,000\,000\,001 = 10^{-9}$	адна мільярдная
піка	п	$0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$	адна трыльённая
фемта	ф	$0,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-15}$	адна квадрыльённая
ата	а	$0,000\,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-18}$	адна квінтыльённая

### 4. Асноўныя фізічныя пастаянныя

Нармальнае паскарэнне свабоднага падзення  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

Гравітацыйная пастаянная  $G = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

Малярная газавая пастаянная  $R = 8,31 \text{ Дж/(К}\cdot\text{моль)}$

Аб'ём 1 моля газа пры нармальных умовах  $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$

Лік Лашмідта  $n_0 = 2,69 \cdot 10^{25} \cdot \text{м}^{-3}$

Пастаянная Больцмана  $k = R/N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$

Лік Фарадэя  $F = N_A e = 9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$

Элементарны зарад  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Маса спакою электрона  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.а.м.}$

Маса спакою пратона  $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00728 \text{ а.а.м.}$

Маса спакою нейтрона  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.а.м.}$

Удзельны зарад электрона  $e/m_e = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$

Скорасць святла ў вакууме  $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

Пастаянная Стэфана—Больцмана  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$

Пастаянная закона скранання Віна  $b = 0,29 \text{ см}\cdot\text{К}$

Пастаянная Планка  $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$$



Пастаянная Рыдберга  $R = 1,10 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$

Радыус першай бораўскай арбіты  $r_1 = 5,29 \cdot 10^{-11} \text{ м}$

Комптанаўская даўжыня хвалі электрона  $\lambda_c = h/m_e c = 2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$

Магнетон Бора  $\mu_B = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$

Атамная адзінка масы 1 а.а.м.  $= 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

Кэфіцыент прапарцыянальнасці паміж масай і энергіяй  $c^2 = 8,99 \cdot 10^{16} \text{ Дж/кг}$

Электрычная пастаянная  $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \text{ Ф/м}$

Магнітная пастаянная  $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}$

### 5. Некаторыя характарыстыкі Сонца, Зямлі і Луны

Фізічны параметр	Сонца	Зямля	Луна
Маса, кг	$1,97 \cdot 10^{30}$	$5,96 \cdot 10^{24}$	$7,30 \cdot 10^{22}$
Радыус, м	$6,95 \cdot 10^8$	$6,37 \cdot 10^6$	$1,74 \cdot 10^6$
Сярэдняя шчыльнасць, кг/м <sup>3</sup>	1410	5518	3350
Сярэдняя адлегласць ад Зямлі, км	$1,496 \cdot 10^8$	—	384440

### 6. Шчыльнасць (кг/м<sup>3</sup>)

*Газы (пры тэмпературы 0 ° С і нармальным атмасферным ціску)*

Азот	1,251	Кісларод	1,429
Аміяк	0,771	Метан	0,717
Вадарод	0,090	Паветра	1,293
Вуглякіслы газ	1,977	Хлор	3,320

#### *Вадкасці*

Бензол	880	Касторавае масла	950
Вада (+4 ° С)	1000	Кроў (чал.)	1050
Вада марская	1030	Малако	1030
Вада цяжкая	1100	Ртуць	13600
Газа	800	Серабро (вадкае)	9300
Гліцэрын	1200	Спірт	790
Золата (вадкае)	17200	Эфір	730

#### *Цвёрдыя целы*

Алюміній	2600	Натрый	970
Болава	7100	Нікель	8800
Жалеза	7900	Плаціна	21400
Золата	19300	Пробка	200
Калій	870	Свінец	11300
Каменная соль	2200	Серабро	10500
Латунь	8400	Сталь	7700
Лёд	900	Шкло	2700
Медзь	8600		

### 7. Шчыльнасць вады пры розных тэмпературах

Тэмпература, °С	20	30	40	50	60	70	80
Шчыльнасць, кг/м <sup>3</sup>	998	996	992	988	983	978	972

### 8. Модуль пругкасці (ГПа)

Алюміній	70	Медзь	120
Дрэва	10	Свінец	17
Дзюралюміній	75	Сталь(жалеза)	210
Кірпіч	10	Чугун	100
Латунь	90	Каучук	0,008

### 9. Скорасць гуку (м/с)

Алюміній	5100	Латунь	3500
Вада	1450	Медзь	3700
Жалеза	5300	Паветра (0° С)	332
Золата	2030	Паветра (-10° С)	326
Кірпіч	3650	Свінец	1200

### 10. Каэфіцыент цеплавога расшырэння (К<sup>-1</sup>)

<i>Лінейнае расшырэнне</i>	
Алюміній	2,4·10 <sup>-5</sup>
Жалеза (сталь)	1,2·10 <sup>-5</sup>
Латунь	1,9·10 <sup>-5</sup>
Медзь	1,7·10 <sup>-5</sup>
Шкло	1·10 <sup>-5</sup>
Цынк	2,9·10 <sup>-5</sup>
<i>Аб'ёмнае расшырэнне</i>	
Вада (5—10° С)	0,000053
Вада (10—20° С)	0,000150
Вада (20—40° С)	0,000302
Вада (40—60° С)	0,000458
Вада (60—80° С)	0,000587
Газа (18° С)	0,0010
Гліцэрын (18° С)	0,00050
Ртуць (18° С)	0,00018
Спірт этылавы (18° С)	0,00110

### 11. Удзельная цеплаёмістасць

#### *Цвёрдыя і вадкія целы*

Рэчыва	Удзельная цеплаёмістасць, Дж/(кг·К)
Алюміній	898
Бензін (50° С)	2095
Вісмут	130
Вада (20° С)	4190
Вальфрам	195
Жалеза (сталь)	460
Латунь	386
Лёд	2100
Масла трансфарматарнае (20° С)	1800
Медзь	395
Ртуць	138
Свінец	131
Спірт	2510

## Газы і пара

Рэчыва	$C_p$ , Дж/(кг·К)	$C_v$ , Дж/(кг·К)	$\gamma = C_p / C_v$
Аміак (NH <sub>3</sub> )	2140	1630	1,31
Аргон (Ar)	532	320	1,66
Вуглякіслы газ (CO <sub>2</sub> )	848	654	1,30
Гелій (He)	5240	3140	1,66
Кісларод (O <sub>2</sub> )	913	649	1,40
Метан (CH <sub>4</sub> )	2373	1854	1,28
Паветра	1020	729	1,40
Пары вады (H <sub>2</sub> O)	1820	1380	1,32

## 12. Дыяметры малекул і атамаў (нм)

Азот (N <sub>2</sub> ) 0,31	Кісларод (O <sub>2</sub> ) 0,29
Аргон (Ar) 0,29	Вокісь вуглярода (CO) 0,32
Вадарод (H <sub>2</sub> ) 0,23	
Вадзяная пара	Вуглякіслы газ (CO <sub>2</sub> ) 0,33
Гелій (He) 0,19	Хлор (Cl <sub>2</sub> ) 0,37

## 13. Вязкасць вадкасцей, газаў і пары

Рэчыва	Тэмпература, °С	Вязкасць, мкПа·с
Азот	0	16,7
Вада	20	1004
Вуглякіслы газ	0	13,7
Гелій	0	18,6
Кісларод	0	19,2
Паветра	21,6	18,4
Пары вады	0	8,7
Хлор	0	12,9

## 14. Пастаянныя Ван-дэр-Ваальса

Рэчыва	$a$ , Дж·м <sup>3</sup> /моль <sup>2</sup>	$b$ , 10 <sup>-5</sup> м <sup>3</sup> /моль
Азот	0,136	4
Аргон	0,132	3
Вада	0,554	3
Кісларод	0,137	3
Вуглякіслы газ	0,364	4,3



15. Крытычныя тэмпература і ціск

Рэчыва	$T_k, K$	$p_k, MPa$
Азот	126	3,4
Аргон	151	4,87
Бензол	562	4,8
Вадарод	33	1,3
Вадзяная пара	647	22,0
Вуглякіслы газ	304	7,4
Гелій	5,2	0,23
Кісларод	154	5,07

16. Ціск і шчыльнасць насычаючай пары вады

$t, ^\circ C$	$p, Pa$	$\rho, g/m^3$	$t, ^\circ C$	$p, Pa$	$\rho, g/m^3$
—30	37,3	0,33	12	1402,3	10,7
—29	41,3	0,37	13	1519,6	11,4
—28	46,7	0,41	14	1598,3	12,1
—27	50,7	0,46	15	1704,9	12,8
—26	57,3	0,51	16	1816,9	13,6
—25	62,7	0,55	17	1936,8	14,5
—24	69,3	0,66	18	2063,5	15,4
—23	77,3	0,68	19	2196,8	16,3
—22	85,3	0,73	20	2338,1	17,3
—21	93,3	0,80	21	2486,0	18,3
—20	102,6	0,85	22	2643,3	19,4
—19	113,3	0,96	23	2808,6	20,6
—18	125,3	1,05	24	2983,3	21,8
—17	137,3	1,15	25	3167,2	23,0
—16	150,6	1,27	26	3360,5	24,4
—15	165,3	1,38	27	3567,1	25,8
—14	181,3	1,51	28	3779,1	27,2
—13	198,6	1,65	29	4004,3	28,7
—12	217,3	1,80	30	4241,6	30,3
—11	237,3	1,96	31	4603,2	31,9
—10	259,9	2,14	32	4753,6	33,9

-9	283,9	2,33	33	5029,4	35,7
-8	337,2	2,54	34	5316,7	37,6
-7	351,9	2,76	35	5622,6	39,6
-6	367,9	2,99	36	5939,8	41,8
-5	401,2	3,24	37	6274,4	44,0
-4	437,2	3,51	38	6623,7	46,3
-3	475,9	3,81	39	6990,3	48,7
-2	517,2	4,13	40	7374,2	51,2
-1	562,5	4,47	45	9581,6	65,4
0	610,5	4,84	50	12330,3	83,0
1	656,1	5,22	55	15729,4	104,3
2	758,4	5,60	60	19915,0	130
3	797,3	5,98	65	24993,8	161
4	812,1	6,40	70	31152,2	198
5	871,1	6,84	75	38577,0	242
6	934,4	7,3	80	47334,8	293
7	1001,1	7,8	85	57798,9	354
8	1073,1	8,3	90	70089,1	424
9	1147,7	8,8	95	84498,9	505
10	1227,7	9,4	100	101303,0	598
11	1300,7	10,0			

## 17. Паверхневае нацяжэнне вадкасцей пры тэмпературы 20 °С

Рэчыва	Паверхневае нацяжэнне, мН/м
Анілін	43
Бензол	30
Вада	73
Вада (70 °С)	64
Газа	30
Гліцэрын	64
Золата (1070 °С)	610
Касторавае масла	33
Мыльны раствор вады	45
Ртуць	500
Серабро (960 °С)	780
Спірт	22

### 18. Цеплаправоднасць рэчыва

Рэчыва	Цеплаправоднасць, Вт/(м·К)
Алюміній	205
Аргон	0,16
Асбест	0,14
Вада	0,58
Вісмут	10
Дрэва (упоперак валокан)	0,17
Жалеза (сталь)	62
Кірпічная кладка	0,84
Лёд	2,2
Медзь	390
Накіп кацельні	2,3
Паветра (пры 0 °С і 760 мм рт. сл.)	0,026
Корак	0,035
Сажа	0,25
Свінец	34,8
Смала	0,52
Шкло	0,74
Эбаніт	0,16

### 19. Тэмпература плаўлення і ўдзельная цеплыня плаўлення

Рэчыва	Тэмпература плаўлення, °С (пры 0,1 МПа)	Удзельная цеплыня плаўлення, кДж/кг
Алюміній	660	387
Волава	232	60
Жалеза	1535	272
Лёд	0	334
Медзь	1083	174
Ртуць	—38,9	11,7
Свінец	327	25
Серабро	960	80
Цынк	420	118

### 20. Дыэлектрычная пранікальнасць рэчыва

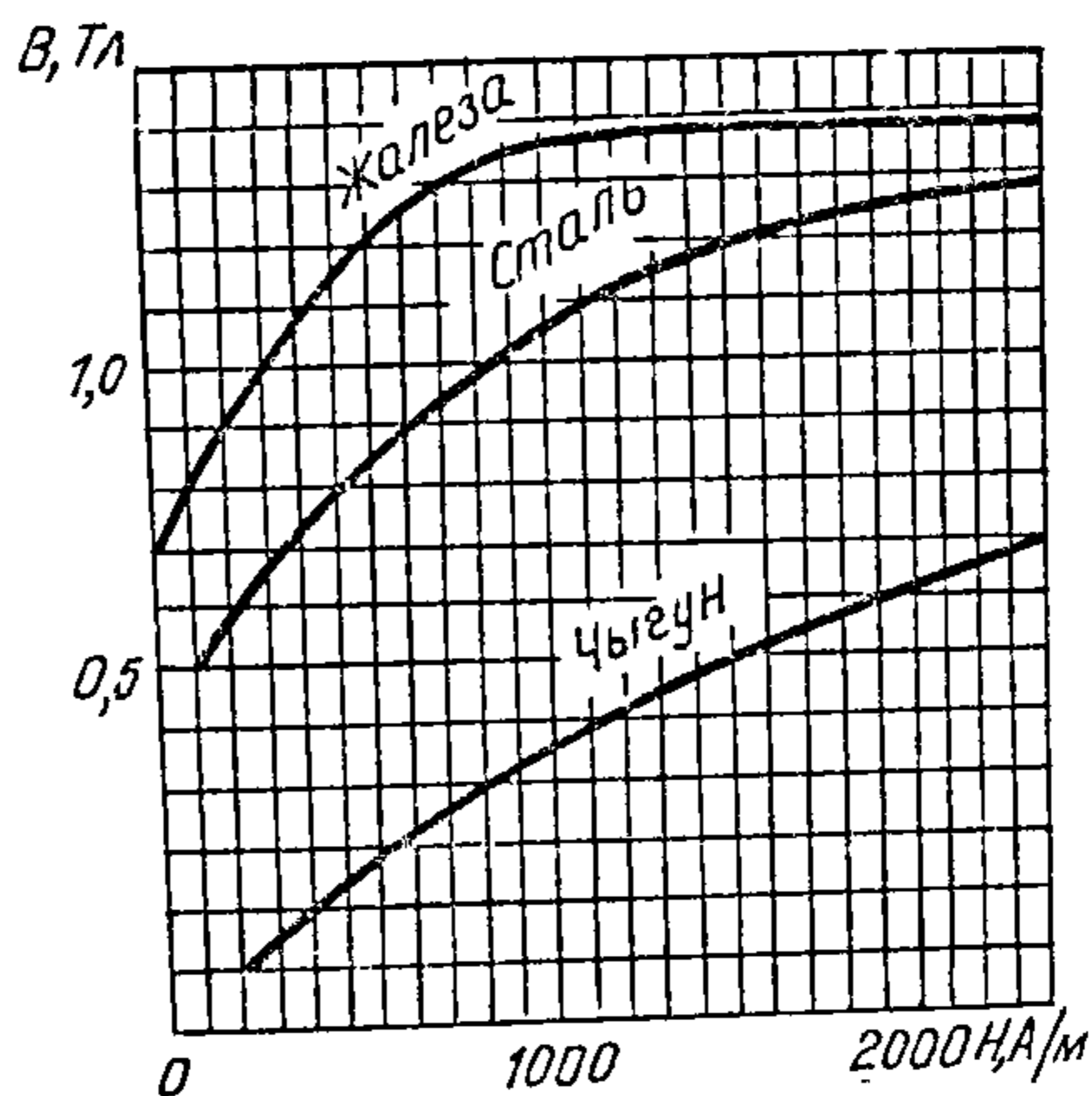
Рэчыва	ε	Рэчыва	ε
Вада (чыстая)	81	Слюда	6
Газа	2	Фарфор	6
Масла трансфарма- тарнае	2,2	Шкло	5,5—10
Парафін	2	Эбаніт	2,6
Парафініраваная папера	3,7		



21. Удзельная пранікальнасць і тэмпературны каэфіцыент (пры 20 °С)

Рэчыва	Удзельнае супраціўленне, нОм·м	Тэмпературны каэфіцыент, К <sup>-1</sup>
Алюміній	28	0,0038
Вальфрам	55	0,0051
Вугаль	40	—0,0008
Графіт	8000	
Жалеза	98	0,0062
Канстантан	480	0,00002
Медзь	17,2	0,0043
Натрый	44	
Нікелін	400	0,000017
Ніхром	980	0,00026
Ртуць	958	0,0009
Свінец	211	0,0042
Серабро	158	
Сталь	120	0,006

22. Залежнасць магнітнай індукцыі ад напружанасці



23. Рухомасць іонаў

Водныя растворы (мм<sup>2</sup> / (В·с))

H <sup>+</sup>	0,326	OH <sup>-</sup>	0,18
Na <sup>+</sup>	0,045	F <sup>-</sup>	0,049
K <sup>+</sup>	0,067	Cl <sup>-</sup>	0,068
Ag <sup>+</sup>	0,056	Br <sup>-</sup>	0,07
NH <sup>+</sup>	0,067	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,064

Газы (пры 0 °С і 760 мм рт.сл.) (см<sup>2</sup>/(В·с))

Рэчыва	Дадатковыя іоны	Адмоўныя іоны
Азот	1,3	1,8
Вадарод	5,4	7,4
Вокісь вуглярода	1,0	1,1
Кісларод	1,3	1,8
Паветра	1,4	1,9
Хлор	0,6	0,5

24. Работа іанізацыі (эВ)

Азот	15,8	Гелій	24,45
Аргон	15,7	Кісларод	13,56
Вадарод	15,4	Натрый	5,12
Вуглякіслы газ	14,4	Неон	21,48

25. Электрахімічныя эквіваленты (мг/Кл)

Алюміній (Al <sup>+++</sup> )	0,093	Медзь (Cu <sup>++</sup> )	0,329
Вісмут (Bi <sup>+++</sup> )	0,719	Нікель (Ni <sup>++</sup> )	0,304
Жалеза (Fe <sup>++</sup> )	0,289	Нікель (Ni <sup>+++</sup> )	0,203
Жалеза (Fe <sup>+++</sup> )	0,193	Серабро (Ag <sup>+</sup> )	1,118
Золата (Au <sup>+</sup> )	2,043	Хром (Cr <sup>+++</sup> )	0,180
Золата (Au <sup>++</sup> )	0,681	Цынк (Zn <sup>++</sup> )	0,338
Медзь (Cu <sup>+</sup> )	0,660		

26. Паказчыкі пераламлення (сярэдня для бачных хваляў)

Алмаз	2,42	Лёд (-4 °С)	1,31
Вада (20 °С)	1,33	Шкіпінар (20 °С)	1,47
Кварц	1,54	Шкло	1,5

27. Работа выхаду электронаў з металаў (эВ)

Вальфрам	4,5	Нікель	5,0
Жалеза	4,74	Плаціна	5,29
Золата	4,68	Ртуць	4,52
Калій	2,0	Рубідый	2,13
Ліцій	2,4	Серабро	4,74
Магній	3,46	Тантал	4,07
Медзь	4,47	Цэзій	1,97
Малібдэн	4,2	Цынк	4,0
Натрый	2,3		

## 28. Перыяды паўраспада некаторых радыёактыўных рэчываў

Вісмут	$^{210}_{85}\text{Bi}$	5,02 сут
Ірыдый	$^{192}_{77}\text{Ir}$	75 сут
Кальцый	$^{45}_{20}\text{Ca}$	164 сут
Натрый	$^{24}_{11}\text{Na}$	15,3 гадз
Палоній	$^{210}_{84}\text{Po}$	138 сут
Радый	$^{226}_{88}\text{Ra}$	1600 гадоў
Радон	$^{226}_{86}\text{Rn}$	3,82 сут
Стронцый	$^{90}_{38}\text{Sr}$	28 гадоў
Торый	$^{232}_{90}\text{Th}$	$1,39 \cdot 10^{11}$ гадоў
Уран	$^{235}_{92}\text{U}$	$7,1 \cdot 10^8$ гадоў
Уран	$^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ гадоў
Фосфар	$^{32}_{15}\text{P}$	14,28 сут
Цэзій	$^{137}_{55}\text{Cs}$	33 сут

## 29. Масы некаторых ізатопаў (а.а.м.)

$^1_1\text{H}$ 1,00783	$^{14}_7\text{N}$ 14,00307	$^{60}_{27}\text{Co}$ 59,95250
$^2_1\text{H}$ 2,01410	$^{16}_6\text{O}$ 15,99491	$^{60}_{28}\text{Ni}$ 59,9308
$^3_1\text{H}$ 3,01605	$^{17}_6\text{O}$ 18,99913	$^{131}_{54}\text{Xe}$ 130,9051
$^3_2\text{He}$ 3,01603	$^{19}_9\text{F}$ 18,99840	$^{207}_{82}\text{Pb}$ 207,04034
$^4_2\text{He}$ 4,00260	$^{20}_{10}\text{Na}$ 19,99244	$^{208}_{82}\text{Pb}$ 208,04140
$^6_3\text{Li}$ 6,01512	$^{23}_{10}\text{Na}$ 22,9897	$^{209}_{83}\text{Bi}$ 209,04550
$^7_4\text{Li}$ 7,01601	$^{24}_{10}\text{Na}$ 23,99097	$^{210}_{83}\text{Bi}$ 210,04951
$^7_4\text{Be}$ 7,01693	$^{24}_{12}\text{Mg}$ 23,00111	$^{210}_{84}\text{Po}$ 210,04826
$^8_4\text{Be}$ 8,00531	$^{27}_{13}\text{Al}$ 26,98154	$^{222}_{86}\text{Rn}$ 222,08663
$^9_4\text{Be}$ 9,01219	$^{28}_{13}\text{Al}$ 27,9769	$^{226}_{88}\text{Ra}$ 226,09574
$^{10}_4\text{Be}$ 10,01354	$^{28}_{14}\text{Si}$ 27,9769	$^{232}_{90}\text{Th}$ 232,11034
$^{10}_5\text{B}$ 10,01294	$^{30}_{14}\text{Si}$ 29,97377	$^{234}_{90}\text{Th}$ 234,11650
$^{11}_5\text{B}$ 11,00930	$^{30}_{15}\text{P}$ 29,98817	$^{235}_{92}\text{U}$ 235,04393
$^{11}_6\text{C}$ 11,01143	$^{31}_{15}\text{P}$ 30,97376	$^{238}_{92}\text{U}$ 238,05353
$^{12}_6\text{C}$ 12,0	$^{56}_{26}\text{Fe}$ 55,9349	$^{239}_{92}\text{U}$ 239,12869
$^{13}_7\text{N}$ 13,00574	$^{59}_{27}\text{Co}$ 58,93320	$^{241}_{93}\text{Np}$ 241,13250



30. Показательные функции

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
0,00	1,0000	1,0000	2,00	7,3891	0,1353
0,05	1,0513	0,9512	2,05	7,7679	0,1287
0,10	1,1052	0,9048	2,10	8,1662	0,1225
0,15	1,1618	0,8607	2,15	8,5849	0,1165
0,20	1,2214	0,8187	2,20	9,0250	0,1108
0,25	1,2840	0,7788	2,25	9,4877	0,1054
0,30	1,3499	0,7408	2,30	9,9742	0,1003
0,35	1,4191	0,7047	2,35	10,486	0,09537
0,40	1,4918	0,6703	2,40	11,023	0,09072
0,45	1,5683	0,6376	2,45	11,588	0,08629
0,50	1,6487	0,6065	2,50	12,182	0,08208
0,55	1,7333	0,5770	2,55	12,807	0,07808
0,60	1,8221	0,5488	2,60	13,464	0,07427
0,65	1,9155	0,5221	2,65	14,154	0,07065
0,70	2,0138	0,4966	2,70	14,880	0,06721
0,75	2,1170	0,4724	2,75	15,643	0,06393
0,80	2,2255	0,4493	2,80	16,445	0,06081
0,85	2,3396	0,4274	2,85	17,288	0,05784
0,90	2,4596	0,4066	2,90	18,174	0,05502
0,95	2,5857	0,3867	2,95	19,106	0,05234
1,00	2,7183	0,3679	3,00	20,086	0,04979
1,05	2,8577	0,3499	3,05	21,115	0,04736
1,10	3,0042	0,3329	3,10	22,198	0,04505
1,15	3,1582	0,3166	3,15	23,336	0,04285
1,20	3,3201	0,3012	3,20	24,533	0,04076
1,25	3,4903	0,2865	3,25	25,790	0,03877
1,30	3,6693	0,2725	3,30	27,113	0,03688
1,35	3,8574	0,2592	3,35	28,503	0,03508
1,40	4,0552	0,2466	3,40	29,964	0,03337
1,45	4,2631	0,2346	3,45	31,500	0,0317
1,50	4,4817	0,2231	3,50	33,115	0,03020
1,55	4,7115	0,2123	3,55	34,813	0,02872
1,60	4,9530	0,2019	3,60	36,598	0,02732
1,65	5,2070	0,1921	3,65	38,475	0,02599
1,70	5,4739	0,1827	3,70	40,447	0,02472

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
1,75	5,7546	0,1738	3,75	42,521	0,02352
1,80	6,0496	0,1653	3,80	44,701	0,02237
1,85	6,3598	0,1572	3,85	46,993	0,02128
1,90	6,6859	0,1496	3,90	49,402	0,02024
1,95	7,0287	0,1423	3,95	51,935	0,01925
4,00	54,598	0,01832	6,0	403,43	0,00248
4,05	57,397	0,01742	6,1	445,86	0,00224
4,10	60,340	0,01657	6,2	492,75	0,00203
4,15	63,434	0,01576	6,3	544,57	0,00184
4,20	66,686	0,01500	6,4	601,85	0,00166
4,25	70,105	0,01426	6,5	665,14	0,001503
4,30	73,700	0,01357	6,6	735,10	0,001360
4,35	77,478	0,01291	6,7	812,41	0,001231
4,40	81,451	0,01228	6,8	897,85	0,001114
4,45	85,627	0,01168	6,9	992,27	0,001008
4,50	90,017	0,01111	7,0	1096,6	0,000912
4,55	94,632	0,01057	7,1	1212,2	0,000825
4,60	99,484	0,01005	7,2	1339,4	0,000747
4,65	104,58	0,00956	7,3	1480,5	0,000676
4,70	109,95	0,00910	7,4	1636,0	0,000611
4,75	115,58	0,00865	7,5	1808,0	0,000553
4,80	121,51	0,00823	7,6	1998,2	0,000500
4,85	127,74	0,00783	7,7	2208,3	0,000453
4,90	134,29	0,00745	7,8	2440,6	0,000410
4,95	141,17	0,00708	7,9	2697,3	0,000371
5,00	148,41	0,00674	8,0	2981,0	0,000335
5,05	156,02	0,00641	8,1	3294,5	0,000304
5,10	164,02	0,00610	8,2	3641,0	0,000275
5,15	172,43	0,00580	8,3	4023,9	0,000249
5,20	181,27	0,00552	8,4	4447,1	0,000225
5,25	190,57	0,00525	8,5	4914,8	0,000203
5,30	200,34	0,00499	8,6	5431,7	0,000184
5,35	210,61	0,00475	8,7	6002,9	0,000167
5,40	221,41	0,00452	8,8	6634,2	0,000151
5,45	232,76	0,00430	8,9	7332,0	0,000136

$x$	$e^x$	$e^{-x}$	$x$	$e^x$	$e^{-x}$
5,50	244,69	0,00409	9,0	8103,1	0,000123
5,55	257,24	0,00389	9,1	8955,3	0,000112
5,60	270,43	0,00370	9,2	9897,1	0,000101
5,65	284,29	0,00352	9,3	10938	0,000091
5,70	298,87	0,00335	9,4	12088	0,000083
5,75	314,19	0,00318	9,5	13360	0,000075
5,80	330,30	0,00303	9,6	14765	0,000068
5,85	347,23	0,00288	9,7	16318	0,000061
5,90	365,04	0,00274	9,8	18034	0,000055
5,95	383,75	0,00261	9,9	19930	0,000050
			10,0	22026	0,000045



## ЗМЕСТ

Прадмова . . . . .	3
<b>Раздзел I. МЕХАНІКА</b>	
§ 1. Кінематыка . . . . .	5
Прамалінейны рух . . . . .	6
Крывалінейны рух . . . . .	10
Вярчальны рух . . . . .	11
Вагальны рух . . . . .	12
§ 2. Дынаміка матэрыяльнага пункта і сістэма матэрыяльных пунктаў . . . . .	13
§ 3. Законы захавання энергіі, імпульсу і моманту імпульсу . . . . .	19
§ 4. Механіка цвёрдага цела . . . . .	24
Дынаміка вярчальнага руху цвёрдага цела . . . . .	25
Раўнавага цвёрдага цела . . . . .	28
§ 5. Механіка вадкасцей і газаў . . . . .	30
Гідра- і аэрастатыка . . . . .	31
Гідра-і аэрадынаміка . . . . .	32
§ 6. Неінерцыяльныя сістэмы адліку. Сілы інерцыі . . . . .	34
§ 7. Элементы спецыяльнай тэорыі адноснасці . . . . .	36
§ 8. Пругкія ўласцівасці цел . . . . .	39
§ 9. Механічныя ваганні і хвалі . . . . .	41
Ваганні . . . . .	43
Хвалевы рух. Акустыка . . . . .	45
§ 10. Закон сусветнага прыцягнення . . . . .	47
<b>Раздзел II. МАЛЕКУЛЯРНАЯ ФІЗІКА І ТЭРМАДЫНАМІКА</b>	
§ 11. Асновы малекулярна-кінетычнай тэорыі газаў . . . . .	49
Асноўнае ўраўненне кінетычнай тэорыі газаў . . . . .	50
Газавыя законы . . . . .	51
Размеркаванне Максвелла і Больцмана. Бараметрычная формула . . . . .	54
§ 12. З'явы пераносу ў газах . . . . .	56
Сярэдняя даўжыня свабоднага прабегу. Лік сутыкненняў . . . . .	57
Дыфузія, вязкасць і цеплаправоднасць газаў . . . . .	58
§ 13. Першы закон тэрмадынамікі . . . . .	59
Цеплаёмістасць . . . . .	60
Першы закон тэрмадынамікі ў прымяненні да ідэальнага газу . . . . .	61
Элементы газадынамікі . . . . .	66
§ 14. Другі закон тэрмадынамікі . . . . .	67
Цеплавая рухавікі і халадзільныя машыны . . . . .	68
Энтрапія . . . . .	72
§ 15. Рэальныя газы і вадкасці . . . . .	74
Рэальныя газы . . . . .	75
Вадкасці . . . . .	77
§ 16. Цеплавая ўласлівасці цвёрдых цел. Фазавыя переходы . . . . .	81
Цеплавая ўласлівасці цвёрдых цел . . . . .	81
Фазавыя пераходы . . . . .	83

### Раздзел III. ЭЛЕКТРЫЧНАСЦЬ І МАГНЕТЫЗМ

§	Электростатыка . . . . .	84
	Закон Кулона . . . . .	85
	Напружанасць і патэнцыял поля . . . . .	87
	Праваднікі і дыэлектрыкі ў электрычным полі . . . . .	90
	Электраёмістасць . . . . .	93
	Энергія электрычнага поля . . . . .	96
§	18. Пастаянны электрычны ток . . . . .	98
	Закон Ома . . . . .	99
	Правіла Кірхгофа . . . . .	104
	Работа і магутнасць току . . . . .	108
§	19. Тэрмаэлектронная эмісія і кантактныя з'явы . . . . .	111
	Тэрмаэлектронная эмісія . . . . .	112
	Кантактныя з'явы . . . . .	113
§	20. Электрычны ток у электралітах і газах . . . . .	113
	Электрычны ток у электралітах . . . . .	114
	Электрычны ток у газах . . . . .	115
§	21. Магнітнае поле. Дзеянне магнітнага поля на зарады і токі, якія рухаюцца . . . . .	116
§	22. Электрамагнітная індукцыя . . . . .	124
	Энергія магнітнага поля . . . . .	124
§	23. Пераменны ток. Электрамагнітныя ваганні і хвалі . . . . .	128

### Раздзел IV. ОПТЫКА

§	24. Інтэрферэнцыя святла . . . . .	132
§	25. Дыфракцыя святла . . . . .	137
§	26. Геаметрычная оптыка . . . . .	141
	Адбіццё святла . . . . .	142
	Праламленне святла . . . . .	143
	Лінзы і аптычныя сістэмы . . . . .	145
	Аптычныя прылады . . . . .	148
§	27. Фотаметрыя . . . . .	150
§	28. Палярызацыя святла . . . . .	153
§	29. Дысперсія і паглыннанне святла. Рассейванне святла . . . . .	156
§	30. Рэлятывісцкія эфекты ў оптыцы . . . . .	158

### Раздзел V. КВАНТАВАЯ ФІЗІКА

§	31. Квантавыя ўласцівасці выпраменьвання . . . . .	161
	Энергія, імпульс і маса фатона . . . . .	163
	Фотаэфект . . . . .	164
	Ціск святла . . . . .	165
	Рэнтгенаўскае паглыннанне . . . . .	166
	Закон Мозлі . . . . .	166
	Эфект Комптана. Інтэнсіўнасць рэнтгенаўскіх прамянёў . . . . .	167
	Цеплае выпраменьванне . . . . .	168
§	32. Хвалевыя ўласцівасці рэчыва . . . . .	171
	Хвалі дэ Бройля . . . . .	173
	Прынцып невызначальнасці Гейзенберга . . . . .	174
	Ураўненне Шродзінгера . . . . .	175
§	33. Будова атамаў і малекул . . . . .	176
§	34. Квантавыя з'явы ў цвёрдых целах . . . . .	180
§	35. Фізіка атамнага ядра . . . . .	185

Эксперыментальныя метады ядзернай фізікі . . . . .	186
Будова атамнага ядра . . . . .	187
Закон радыёактыўнага распаду . . . . .	188
Актыўнасць. Радыёактыўная раўнавага . . . . .	189
Ядзерныя рэакцыі . . . . .	190
§ 36. Элементарныя часцінкі . . . . .	192
АДКАЗЫ І РАШЭННІ . . . . .	196
ДАДАТАК . . . . .	261



Вучэбнае выданне

Цэдрык Міхаіл Сямёнавіч, Мікуліч Аляксей Сцяпанавіч, Савіцкая Інеса Фёдараўна,  
Загуста Генадзь Аляксандравіч, Макеева Галіна Паўлаўна

Зборнік задач па курсе агульнай фізікі

Загадчык рэдакцыі *Л.Дз.Духвалаў*

Рэдактар *Л.М. Базулька*

Мастацкі рэдактар *А.Г. Званароў*

Тэхнічныя рэдактары *Л.І. Счыслёнак, А.Ф. Зіноўеў*

Карэктары *Н.Б. Кучмель, Т.К. Хваль, Л.А. Ярковіч*

Аператар *І.В. Скубій*

ІБ № 3419

150<sup>00</sup>—

Падпісана да друку з арыгінала-макета 5.05.93. Фармат 60x90/16. Папера друк. Гарнітура Таймс. Друк афсетны. Умоўн. друк. арк. 17,25. Умоўн. фарбаадбіт. 17,25. Ул.-выд. . арк. 19,22. Тыраж 2100 экз. Зак. 5409.

Выдавецтва «Вышэйшая школа» Міністэрства інфармацыі Рэспублікі Беларусь. Ліцэнзія ЛВ-№ 5. 220048, Мінск, праспект Машэрава, 11.

Друкарня «Перамога». 222310, Маладзечна, вул. Таўлая, 11.