

■ ■

*Рекомендовано
Министерством образования Российской Федерации
в качестве учебного пособия для инженерно-технических
специальностей высших учебных заведений*

11

Москва

ACADEMIA
2006

53(075.8)
22.3 73
761

() .A.

761

—11
ISBN 5 7695 2629 7
(9

« », 2006. — 560 .
, —2004 .)

53(075.8)
22.3 73

« ».

ISBN 5 7695 2629 7

© ., 2004
© .
© .

« », 2004
« », 2004

«
» (: , 1983).
www.yandex.ru
« . ».
trofimova@miem.edu.ru.

— —

(1880 1960;

(1891 — 1955;

—)

—)

(.).

(),

()—

1/299 792 458 .

() —

(

).

() —

9 192 631 770

133.

()—

1

2 • 10⁷

$$(\quad) - 1/273,16$$

$$540 \cdot 10^{12} ,$$

$$(\quad) -$$

$$1/683 / .$$

$$(\quad) -$$

0,012 .

$$(\quad) -$$

$$(\quad) -$$

12

,

.

,

,

.

1

§ 1. (1879—1955).

, ()
 — , —

, (,)

III . . . (287 — 212
 . .)

. — ()
 . (1564 — 1642) ()
 . (1643 — 1727).)
 — 1) ; 2) ; 3) :
 . ;
 , ;
 , .
 , .
 , .
 , .

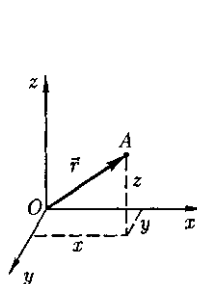
z $r,$

(. 1).

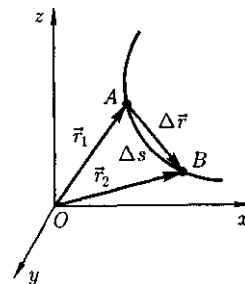
$$x=x(t), y=y(t), z=z(t), \quad (1.1)$$

$$r = r(t). \quad (1.2)$$

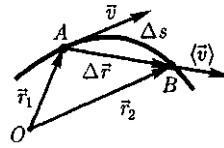
(1.1) (1.2)



.1



.2



(1.2), t (1.1) r_1 (1.3).

At As Δr (v) Δr At: $\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ (2.1)

(2) A Δs_{II} : As = As(t) $\Delta \vec{r} = r_2 - r_1$ $\frac{\Delta r}{At}$ v:

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

As. $|\Delta \vec{r}|$ (1.3) Δt $\frac{\Delta s}{|\Delta \vec{r}|}$

§ 2.

$$v = |\vec{v}| = \left| \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \right| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} =$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt}.$$

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (2.2)$$

(v) —

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

3
As > |Ar|,

$$\langle v \rangle > |Av|,$$

$$As = |Ar|.$$

$$(2.2) \quad ds = v dt \quad t \quad t + \Delta t,$$

At:

$$s = \int_t^{t+\Delta t} v dt. \quad (2.3)$$

; (2.3)

$$s = v \int_t^{t+\Delta t} dt = v \Delta t.$$

t₁ t₂

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt.$$

§ 3. Ускорение

t. At

B
v

$$v_1 = v + \Delta v.$$

Av (. 4).

t + Δt

Δv̄ κ

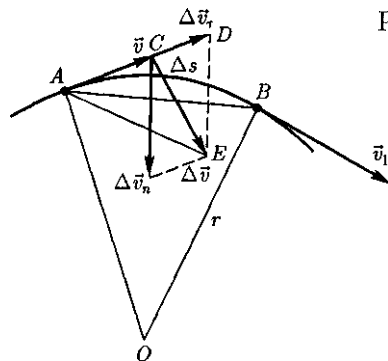
At:

$$\Delta \vec{v} = \Delta \vec{v} / \Delta t$$

) t

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

Рис. 4



$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v^2}{r}$$

$$\Delta \vec{v} \quad (4)$$

$$AD, \quad CD, \quad \frac{v_1}{\Delta \vec{v}_\tau}$$

(5):

$$\Delta t : \frac{\Delta v_\tau}{\Delta \vec{v}_n} = \frac{v_1}{\Delta \vec{v}} \quad \Delta t$$

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$$

no

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_\tau}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt}$$

(),

$$a_\tau \quad a_n$$

As

$$\frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v v_1}{r}, \quad \frac{\Delta v_n}{AB} = \frac{v_1}{r}$$

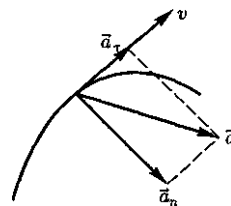
- 1) $a_\tau = 0, a_n = \frac{v^2}{r}$;
- 2) $a_\tau = \text{const}, a_n = 0$ —

$$\frac{\Delta v_n}{\Delta t} = \frac{v v_1}{r}, \quad \text{At } \rightarrow 0, \quad v_1 \rightarrow v, \quad \vec{v}_1 \rightarrow \vec{v}, \quad EAD$$

$$a_\tau = a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

$$EAD, \quad v, \quad \Delta \vec{v}_n, \quad ADE, \quad \vec{v}_n$$

$$t_1 = 0, \quad v_1 = v_0, \quad .5$$



приняв $t_2 = t$ и $v_2 = v$,
 $a = \frac{v - v_0}{t}$, откуда
 $v = v_0 + at$.

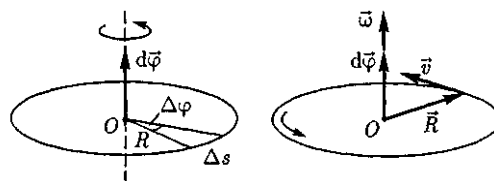


Рис. 6

7

$$s = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{at^2}{2};$$

3) $a_\tau = f(t)$, $a_n = 0$ —

4) $a_\tau = 0$, $a_n = \text{const}$. $a_\tau = 0$

$$a_n = \frac{v^2}{r}$$

ДОЛЖЕН БЫТЬ

5) $a_\tau = 0$, $a_n \neq 0$ —

6) $a_\tau = \text{const}$, $a_n \neq 0$ —

7) $a_\tau = f(t)$, $a_n \neq 0$ —

§ 4.

$$\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$$

$\vec{\omega}$

$$d\vec{\varphi} \text{ (. 7)}$$

$$\dim \omega = T^{-1}$$

$$\text{(/)}$$

$$\text{(. 6)}$$

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R \Delta \varphi}{\Delta t} = R \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = R \omega$$

$$R \text{ (.)}$$

$$v = \omega R$$

6).

$$At$$

$$\Delta \varphi$$

$$\text{()}$$

$$\text{(} \Delta \vec{\varphi} \text{ или } d\vec{\varphi} \text{)}$$

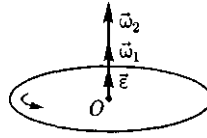
$$d\vec{\varphi}$$

$$v = [\vec{\omega} R]$$

$$\omega R \sin(\vec{\omega} \vec{R}),$$

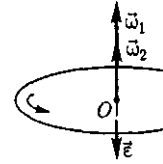
Г R.

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



$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} > 0$$

.8



$$\frac{d\vec{\omega}}{dt} < 0$$

.9

G5

$$\Delta\varphi = 2\pi, \text{ то } \omega = \frac{2\pi}{T},$$

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

$$n = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

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

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$$

2π. (.8),

ε

(.9).

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}, v = \omega R$$

$$a_\tau = \frac{d(\omega R)}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\varepsilon.$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R.$$

(, s,

R,

v,

a_τ,

a_n)

(поворота φ,

ω,

ε)

$$s = R\varphi, v = R\omega, a_\tau = R\varepsilon, a_n = \omega^2 R.$$

(ε = const)

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2},$$

ω₀ —

•
•
•

?

?

?

?

?

- ? ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?

1.1. $s = + Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($= 0,1 / ^2, D = 0,03 / ^3$). : 1) $2 / ^2; 2) [1] 10 ; 2) 1,1 / ^2]$ ()

1.2. $R = 0,1$ $\omega = 2At + 5Bt^4$ ($A = 2 / ^2$ и $B = 1 / ^5$). $t = 1$ с $1/4$ [45°]

1.3. время. [$= 8,5 / ^2; N = 0,48$]

1.4. $a_n = + Bt + Ct^2$ ($= 1 \text{ м/с}^2, B = 6 / ^3, C = 3 / ^4$). $r = 4$: 1) ; 2) $t_1 = 5$; 3) $t_2 = 1$. [1] $6 / ^2; 2) 85 ; 3) 6,32 / ^2]$

1.5. $300 \quad 180$ "1. : 1) ; 2) $t = 1$; 3) [1] $0,21 / ^2; 2) 240]$

1.6. $R = 10$ $\varphi = + Bt + Ct^2 + Dt^3$ ($= 1 / , = 1 / ^2, D = 1 / ^3$). : 1) a_n ; 2) ; 3) [1] $1,4 / ^2; 2) 28,9 / ^2; 3) 28,9 / ^2]$

2

§ 5. « » (1687).

() ()

$$\vec{v} \sim F \quad (F = \text{const}). \quad (6.1)$$

$$a \sim \frac{1}{m} \quad (F = \text{const}). \quad (6.2)$$

$$\vec{a} \sim \frac{k\vec{F}}{m}. \quad (6.3)$$

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (6.4)$$

— 1.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m},$$

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (6.4)$$

(6.4)

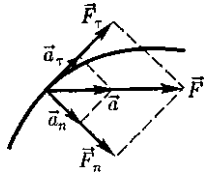
$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}). \quad (6.5)$$

$$p = mv, \quad (6.6)$$

$$F_1, F_2, \dots, F_n$$

$$\vec{a} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \sum_{i=1}^n \vec{a}_i,$$

$$\text{где } \vec{a}_i = \frac{\vec{F}_i}{m}.$$



$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}, \tag{7.1}$$

$$F_{12} = \dots$$

$$; F_{21} = \dots$$

$$(\dots)$$

$$(\dots)$$

10

$$F = \dots$$

$$: F_\tau (\dots)$$

F_n (

нормали к центру кривизны). Используя выражения $a_\tau = \frac{dv}{dt}$ и $a_n = \frac{v^2}{R}$, а также $v = R\omega$, можно записать

$$F_\tau = ma_\tau = m \frac{dv}{dt};$$

$$F_n = ma_n = \frac{mv^2}{R} = m\omega^2 R.$$

§ 7.

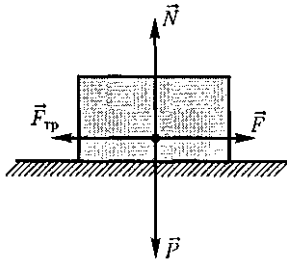
§ 8.

$$(\dots)$$

$$: (\dots)$$

; ,

.11



() ,

() (

(0,1

).

())

())

(. 11),

F.

F

$F_{тр}$

(1663 1705)

(1736 1806)

:

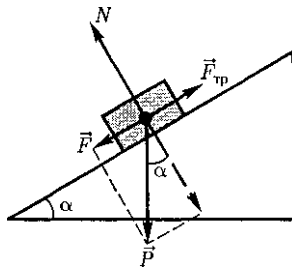
N

$F_{тр}$

$$F_{тр} = fN,$$

/ —

.12



(. 12),

составляющая \vec{F}
 $\vec{F}_{тр}$.

($\sin \alpha - fN = fP \cos \alpha$,) $F = F_{тр}$,

$$f = \operatorname{tg} \alpha_0, \quad f_k = \dots, \quad \dim f_k = L; r = \dots, \quad \alpha_0, \quad (8.1)$$

§ 9.

$$F_{\text{тр}} = f_{\text{нст}}(N + Sp_0),$$

$f_{\text{нст}} = \dots$
 $; S = \dots$
 $; p_0 = \dots$

(),

(10),

).

(

(...).

$$\dots, m_n \text{ и } v_1, v_2, v_n, \quad F'_1, F'_2, \dots, F'_n = \dots, \quad m_1, m_2, \dots$$

$F_1, F_2, \dots, F_n = \dots$
 СИЛ.

$$J_k > \quad (8.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1) &= \vec{F}'_1 + \vec{F}_1, \\ \frac{d}{dt}(m_2\vec{v}_2) &= \vec{F}'_2 + \vec{F}_2, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{d}{dt}(m_n\vec{v}_n) &= \vec{F}'_n + \vec{F}_n. \end{aligned} \quad (9.1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) &= \\ = \vec{F}'_1 + \vec{F}'_2 + \dots + \vec{F}'_n + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n) &= \\ = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n, \end{aligned}$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n, \quad (9.1)$$

где $\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i$ — импульс системы.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt}(m_i\vec{v}_i) = 0, \text{ т.е.}$$

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{v}_i = \text{const.}$$

$$r_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i\vec{r}_i}{m},$$

m_i и r_i —

i -й

ме; $m = \sum_{i=1}^n m_i$ — масса системы.

$$v_C = \frac{dr_C}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \frac{d\vec{r}_i}{dt}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i}{m}.$$

Учитывая, что $\vec{p}_i = m_i \vec{v}_i$, а $\sum_{i=1}^n \vec{p}_i$ есть импульс \vec{p} системы, можно записать

$$p = m \vec{v}_C, \quad (9.2)$$

(9.1),

$$m \frac{d\vec{v}_C}{dt} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n, \quad (9.3)$$

(9.2)

§ 10.

... , v , dt — dm , а $v + dv$.

$$dp = [(m - dm)(\vec{v} + d\vec{v}) + dm(\vec{v} + \vec{u})] - m\vec{v},$$

u — ОТНО-

$$dp = m d\vec{v} + u dm$$

$$(\quad , \quad dm d\vec{v} -$$

).

$$dp = F dt,$$

$$\vec{F} dt = m d\vec{v} + \vec{u} dm,$$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \vec{u} \frac{dm}{dt}. \quad (10.1)$$

F_p .

$$m \vec{a} = \vec{F} + \vec{F}_p, \quad (10.2)$$

(1859—1935).

1881
(1854—1881). 1903
(1857—1935)

(10.1)

$$F = 0$$

$$m_0 = u \ln m_0$$

$$v = u \ln \frac{m_0}{m} \quad (10.3)$$

(),

$$m \frac{dv}{dt} = -u \frac{dm}{dt},$$

: 1)

m_0 ; 2)

u

$$v = -u \int \frac{dm}{m} = -u \ln m + C.$$

(10.2) (10.3)

- система отсчета инерциальной?
- , неинерциальна?
- ?
- ?
- ?
- ?
- () трения ?
- ?
- ?
- ?
- ?
- ?
- ?
- ?
- ?
- ?

2.1.

30°

трения 0,15. [10,9 /]

2.2.

80 .

[28 /]

2.3.

= 30° β = 45°.

($m_1 = m_2 = 2$)

- 1) $f_1 = f_2 = 0,1$; 2) $[1] 0,24 \text{ / } \frac{1}{2}; 2) 12 \text{]}$;
- 2.4. $= 45^\circ$;
- $= 20$; $m = 10$;
- $= 0,002$; $s = 3$; $[v_0 = \sqrt{\frac{2}{\cos \alpha}} = 970 \text{ / }]$
- 2.5. $u = 7 \text{ /}$; $= 5$; $\mu = 25 \text{ /}$;
- $: 1)$; $[1] v = u \left(1 - \exp\left(-\frac{\mu t}{m}\right) \right) = 4,15 \text{ м/с; } 2) 7 \text{ м/с}$; 2)

3

§11. , , некоторые α

$$(F_s = F \cos \alpha),$$

$$A = F_s s = F s \cos \alpha. \quad (11.1)$$

$$(11.1)$$

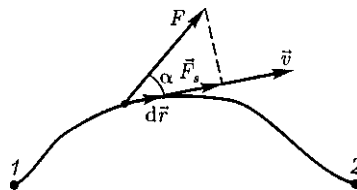
$$F \, dr,$$

$$F \, dr$$

$$dA = F \, d\vec{r} = F \cos \alpha \, ds = F_s \, ds,$$

.13

H
F,



$$ds = |d\vec{r}| = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} dx$$

$$A = \int_1^2 F ds \cos \alpha = \int_1^2 F_s ds \quad (11.2)$$

14),

$$F = \text{const}, \quad \alpha = \text{const},$$

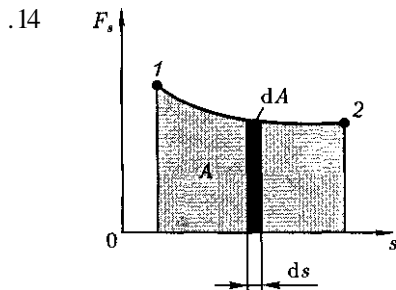
$$A = \int_1^2 F ds \cos \alpha = F \cos \alpha \int_1^2 ds = F_s \cos \alpha,$$

$$(11.1). \\ (11.1)$$

$$\alpha < \frac{\pi}{2}$$

$$\vec{v} \quad (11.3) \quad > \dots$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \quad ($$



$$N = \frac{dA}{dt} = F \frac{dr}{dt} = Fv \quad (11.3)$$

$$N = \frac{dA}{dt} = Fv \quad (11.3)$$

$$N = \frac{\vec{F} d\vec{r}}{dt} = \vec{F} \vec{v}$$

§ 12.

$$F, \quad dA = F \cdot ds, \quad dT = F \cdot ds = dA$$

$$dA = dT$$

$$dA = dT$$

Используя второй закон Ньютона $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$ и умножая на перемещение $d\vec{r}$, получим

$$\vec{F} d\vec{r} = m \frac{d\vec{v}}{dt} d\vec{r} = dA.$$

Так как $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$, то $dA = m\vec{v} d\vec{v} = mv dv = dT$, откуда

$$T = \int_0^v mv dv = \frac{mv^2}{2}.$$

$$T = \frac{mv^2}{2}. \quad (12.1)$$

(12.1)

(12.1)

$$dA = d\Pi. \quad (12.2)$$

$$dr \left(\text{§ 11} \right), \quad F_{\text{на}} \quad (12.2)$$

$$-d\Pi. \quad (12.3)$$

$$\Pi(\vec{r}), \quad F \quad (12.3)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2}$$

v_i —

m_i

i -й

$$\Pi = -\int \vec{F} d\vec{r} + C,$$

$$(12.7)$$

h

$$F_x = -\frac{\partial \Pi}{\partial x}, \quad F_y = -\frac{\partial \Pi}{\partial y}, \quad F_z = -\frac{\partial \Pi}{\partial z},$$

$$\vec{F} = -\text{grad } \Pi, \quad (12.4)$$

$$\text{grad } \Pi = \frac{\partial \Pi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \Pi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \Pi}{\partial z} \vec{k} \quad (12.5)$$

(i, j, k —
(12.5),

grad
VII. V (« ∇ »)

Гамильтона¹ « ∇ »

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}. \quad (12.6)$$

h

$$\Pi = mgh, \quad (12.7)$$

h

$$\Pi_0 = 0.$$

¹У. Гамильтон (1805 — 1865) — ирландский

$$(h'), \quad = -mgh'.$$

).

$$F_{x \text{ yup}} = -kx,$$

$$F_{x \text{ yup}} = -kx,$$

(\leftrightarrow)
 $F_{x \text{ yup}}$

$$F_x = -F_{x \text{ yup}} = kx.$$

$dA,$

$$\frac{F_x}{da},$$

$$dA = F_x dx = kx dx,$$

$$A = \int_0^x kx dx = \frac{kx^2}{2}$$

ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ

$$A = \frac{kx^2}{2}.$$

$$m_1 \frac{d\vec{v}_1}{dt} = \vec{F}'_1 + \vec{F}_1 + f_1,$$

$$m_2 \frac{d\vec{v}_2}{dt} = \vec{F}'_2 + \vec{F}_2 + f_2,$$

$$\dots$$

$$m_n \frac{d\vec{v}_n}{dt} = \vec{F}'_n + \vec{F}_n + f_n.$$

§ 13.

(1711 — 1765),

(1814 — 1878)

1894).

(1821—

m_1, m_2, \dots, m_n
 v_1, v_2, \dots, v_n
 F'_1, F'_2, \dots, F'_n
 F_2, \dots, F_n
 $F_1,$

$f_1, f_2,$
 $v \ll$

$$dt$$

$$d\vec{r}_1, d\vec{r}_2, \dots, d\vec{r}_n,$$

$$d\vec{r}_i = \vec{v}_i dt,$$

$$m_1(\vec{v}_1 d\vec{v}_1) - (\vec{F}'_1 + \vec{F}_1) d\vec{r}_1 = f_1 d\vec{r}_1,$$

$$m_2(\vec{v}_2 d\vec{v}_2) - (\vec{F}'_2 + \vec{F}_2) d\vec{r}_2 = f_2 d\vec{r}_2,$$

$$\dots$$

$$m_n(\vec{v}_n d\vec{v}_n) - (\vec{F}'_n + \vec{F}_n) d\vec{r}_n = f_n d\vec{r}_n.$$

Сложив эти уравнения, получим

$$\sum_{i=1}^n m_i(\vec{v}_i d\vec{v}_i) - \sum_{i=1}^n (\vec{F}'_i + \vec{F}_i) d\vec{r}_i =$$

$$= \sum_{i=1}^n f_i d\vec{r}_i. \quad (13.1)$$

(13.1)

$$\sum_{i=1}^n m_i(\vec{v}_i d\vec{v}_i) = \sum_{i=1}^n d\left(\frac{m_i v_i^2}{2}\right) = dT,$$

dT —

$$\sum_{i=1}^n (\vec{F}'_i + \vec{F}_i) d\vec{r}_i \text{ рав-}$$

« », . . .

$$d\Pi \quad [\dots (12.2)].$$

$$(13.1)$$

$$d(T + \Pi) = dA. \quad (13.2)$$

$$I \quad 2$$

$$\int_1^2 d(T + \Pi) = A_{12},$$

ПОЛНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ

$$(13.2)$$

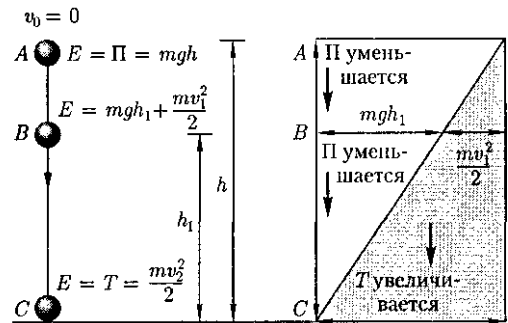
$$d(T + \Pi) = 0,$$

$$+ = E = \text{const}, \quad (13.3)$$

$$. 15)$$

$$(13.3)$$

мами.



. 15

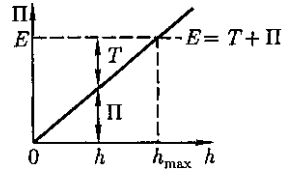


Рис. 16

$$= \Pi(h) -$$

(. 16),

$$\left(\text{tg } \alpha = mg \right).$$

(h). — $h_{\text{тело}}$,

УНИЧТОЖИМОСТИ

$\Pi(h)$.

§14.

$$h = h_{\text{max}}, \quad T = 0 \quad \Pi(h) = E = mgh_{\text{max}}.$$

, . . . = ().

h :

$$T = E - \Pi, \text{ т.е. } \frac{mv^2}{2} = mgh_{\text{max}} - mgh,$$

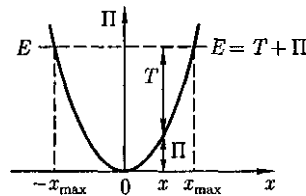
ПЕНЦИАЛЬНЫХ

$$v = \sqrt{2g(h_{\text{max}} - h)}.$$

$$\frac{kx^2}{2} \quad (. 17),$$

(13.3).

$$(12.7), \quad \Pi(h) = mgh.$$



. 17

$$m_1 \text{ и } m_2 \quad \vec{v}'_1 \quad v_2 \quad (v_1 \quad v_2, \text{ 19}).$$

$$\varepsilon = \frac{v'_n}{v_n}$$

$$\varepsilon = 1$$

$$\begin{aligned} < \varepsilon < 1 (\\ \varepsilon \approx 0,56, \\ \varepsilon \approx 0,89, \end{aligned}$$

$$\varepsilon \approx 0).$$

тела

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2, \quad (15.1)$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}. \quad (15.2)$$

$$(15.1) \quad (15.2),$$

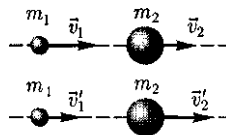


Рис. 19

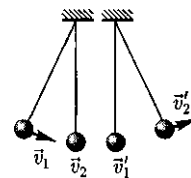


Рис. 20

$$m_1(v_1 - v_1') = m_2(v_2' - v_2), \quad (15.3)$$

$$m_1(v_1^2 - v_1'^2) = m_2(v_2'^2 - v_2^2), \quad (15.4)$$

$$v_1 + v_1' = v_2 + v_2'. \quad (15.5)$$

(15.3) (15.5),

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2}, \quad (15.6)$$

$$v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2}. \quad (15.7)$$

1. $v_2 = 0$ —

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1, \quad (15.8)$$

$$v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1. \quad (15.9)$$

(15.9)

:

) $m_1 = m_2$,

($v_2 = 0$) (. 20),

($v_1' = 0$),

ра ($v_2' = v_1$);

) $m_1 > m_2$,

($v_1' < v_1$).

($v_2' > v_1'$) (. 21);

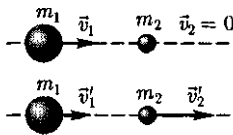


Рис. 21

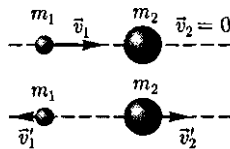


Рис. 22

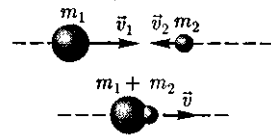


Рис. 23

) $m_1 < m_2$.

отскакивает

меньшей

) $m_2 \gg m_1$ (

(15.8) (15.9)

$\approx \frac{2m_1v_1}{m_2} \approx 0$.

2. $m_1 - m_2$

(15.7)

$$v_1' = v_2, v_2' = v_1,$$

..

»

«

(. 23).

(. 23).

$m_1 m_2$,

$v_1 v_2$,

$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = (m_1 + m_2)\vec{v},$$

v —

$$\vec{v} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}. \quad (15.10)$$

($m_1 - m_2$),

- 3.1. : 1) ; 2) 3) 2 .
- [1) 173 ; 2) 86 ; 3) 173] 45°, 10 , 0,1
- 3.2. брошен 0,3 . 1
- движения : 1) ; 2) 1
- 1 . [1) 17,4 / ; 2) 88,6]
- 3.3. 10 ,
- 3.4. = 10 , $l - 1$ = 5 $v = 500$ / ,
- . [16°30']
- 3.5. r $\Pi(r) = \frac{r^2}{r^2 - r}$, и —
- r_0 ? [$r_0 = -$]
- 3.6. m_2 m_1 =
- = 1,5 : 1) $\frac{m_1}{m_2}$; 2) T_2' ,
- первого $T_1 = 1000$. [1) 5; 2) 555]
- 3.7. $m_1 = 4$ $v_1 = 3$ / и
- . [9]

4

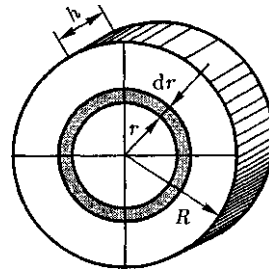
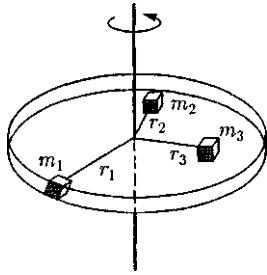
§ 16.

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

—

m_i , (. 24).

$$J = \int r^2 dm,$$



$$dJ = r^2 dm \quad (dr \ll r,$$

$$r), \quad dm =$$

$$2\pi r h dr. \quad dm = 2\pi r h \rho dr \quad dJ = 2\pi h \rho r^3 dr.$$

$$h \quad R$$



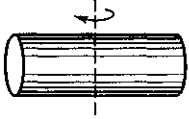
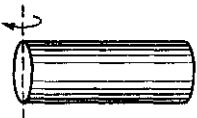
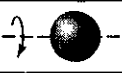
$$J = \int dJ = 2\pi h \rho \int_0^R r^3 dr = \frac{1}{2} \pi h R^4 \rho,$$

$$m = \pi R^2 h \rho,$$

25).

$$r \quad r + dr.$$

1

Тело	Положение оси вращения	Момент инерции
Полый тонкостенный цилиндр радиусом R	Ось симметрии 	$J = mR^2$
Сплошной цилиндр или диск радиусом R	Ось симметрии 	$J = \frac{1}{2} mR^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его середину 	$J = \frac{1}{12} ml^2$
Прямой тонкий стержень длиной l	Ось перпендикулярна стержню и проходит через его конец 	$J = \frac{1}{3} ml^2$
Шар радиусом R	Ось проходит через центр шара 	$J = \frac{2}{5} mR^2$

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

$$\omega = \frac{v_1}{r_1} = \frac{v_2}{r_2} = \dots = \frac{v_n}{r_n}. \quad (17.1)$$

нера:

$$J_C$$

m тела

$$J = J_C + ma^2. \quad (16.1)$$

$$T_{\text{вп}} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} + \dots + \frac{m_n v_n^2}{2},$$

$$T_{\text{вп}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2}.$$

$$(17.1),$$

$$T_{\text{вп}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \omega^2}{2} r_i^2 = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \frac{J_z \omega^2}{2},$$

J_z —
ОСИ z

§ 17.

(§ 1),
 z

$$T_{\text{вп}} = \frac{J_z \omega^2}{2}. \quad (17.2)$$

$$(17.2)$$

$$(12.1)$$

$m_2, \dots, m_n,$
 r_1, r_2, \dots, r_n

на

$m_1,$

$$\left(= \frac{mv^2}{2} \right),$$

(§ 16),

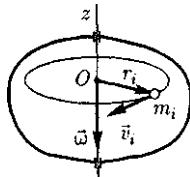
m_i

r_i

v_i (рис.26).

$$(17.2)$$

.26



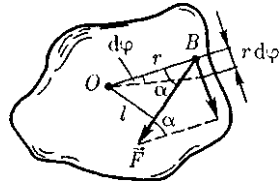
$$T = \frac{mv_C^2}{2} + \frac{J_C \omega^2}{2},$$

m —

; J_C — ; v_C —

двигателя

; ω



.29

§ 18.

$$M_z,$$

$$z (18.28).$$

$$M_z$$

z.

z

$$\vec{M}_z = [\vec{r}\vec{F}]_z.$$

F (рис.27):

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

(18.29).

F

z

r, —

r.

r F .

$$M = Fr \sin \alpha = Fl, \quad (18.1)$$

r и F ; $r \sin \alpha = l$ —

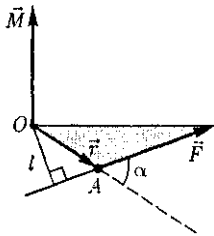
$d\varphi$
 $ds = r d\varphi$ и

$$dA = F \sin \alpha r d\varphi. \quad (18.2)$$

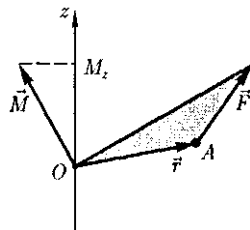
(18.1),

$$dA = M_z d\varphi,$$

$$Fr \sin \alpha = Fl = M_z$$



.27



.28

$dA = dT$, но $dT = d\left(\frac{J_z \omega^2}{2}\right) = J_z \omega d\omega$,
 поэтому $M_z d\varphi = J_z \omega d\omega$, или $M_z \frac{d\varphi}{dt} =$
 $= J_z \omega \frac{d\omega}{dt}$.

Учитывая, что $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, получим

$$M_z = J_z \frac{d\omega}{dt} = J_z \varepsilon. \quad (18.3)$$

(18.3)

§ 20),

$$\vec{M} = J \vec{\varepsilon}, \quad (18.4)$$

J —
 (оси).

§ 19.

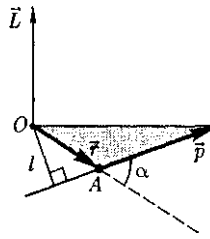
« »
 « »
 ?

)

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

r —
 O A ; $= mv$ —

\vec{L} ↑ .30



(.30); L —
 (. § 4),

\vec{r} к \vec{p} .

$$L = r p \sin \alpha = m v r \sin \alpha = p l,$$

— r p ; l —

L_z ,
 L_z ,

L_z

z .

z

v_i , r_i ,
 v_i

$m_i v_i$
 $m_i \vec{v}_i$.

$$L_{iz} = m_i v_i r_i \quad (19.1)$$

$$L_z = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i.$$

$$(17.1) v_i = \omega r_i,$$

$$L_z = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \omega = \omega \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = J_z \omega,$$

$$L_z = J_z \omega. \quad (19.2)$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (19.3)$$

$$= 0 \quad \frac{dL}{dt} = 0,$$

$$L = \text{const.} \quad (19.4)$$

$$(19.4)$$

(19.2)

$$\frac{dL_z}{dt} = J_z \frac{d\omega}{dt} = J_z \varepsilon = M_z,$$

$$\frac{dL_z}{dt} = M_z.$$

Таблица 2

Поступательное движение		Вращательное движение	
Масса	m	Момент инерции	J
Скорость	$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$	Угловая скорость	$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$
Ускорение	$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$	Угловое ускорение	$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$
Сила	\vec{F}	Момент силы	M_z или \vec{M}
Импульс	$\vec{p} = m\vec{v}$	Момент импульса	$L_z = J_z \omega$
Основное уравнение динамики	$\vec{F} = m\vec{a};$ $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$	Основное уравнение динамики	$M_z = J_z \varepsilon;$ $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$
Работа	$dA = F_s ds$	Работа	$dA = M_z d\varphi$
Кинетическая энергия	$\frac{mv^2}{2}$	Кинетическая энергия	$\frac{J_z \omega^2}{2}$

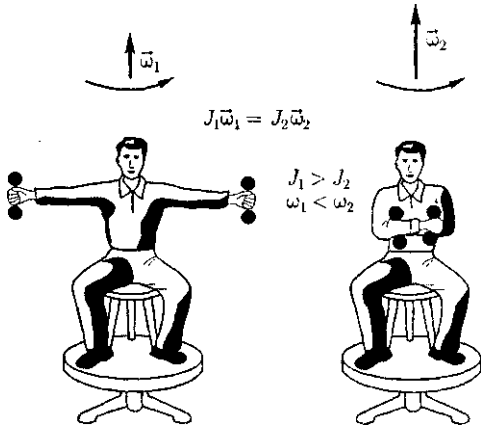


Рис. 31

(. 32).

(. 31), приведен
ω₁.

ω₂

вращения.

(. 2).

§ 20.

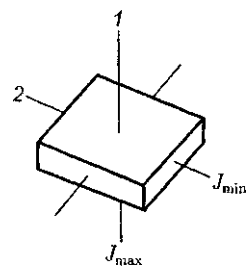
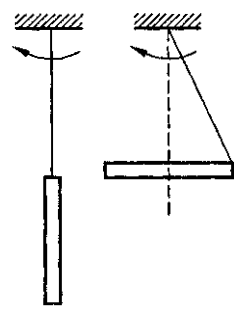
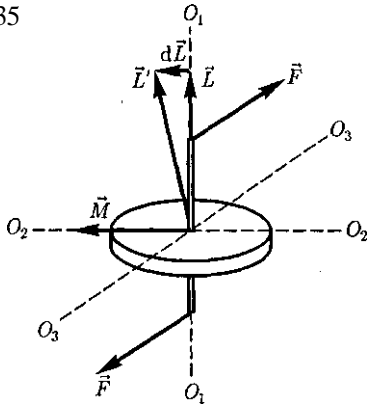


Рис. 32



.33



(§ 27).

F ,

$O_1 O_1$ (.35)
 $O_3 O_3$,

$O_2 O_2$,

и $O_2 O_2$
 $O_3 O_3$ и

F

($O_1 O_1$)
 ,
)

F
 $O_2 O_2$.
 гироскопа
 $= \vec{M} dt$
 $= L + dL$.

dt
 dL

L
 dL —
 $L' =$
 L'

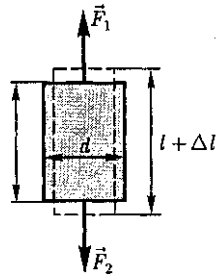
(1819 —

1868)

$O_3 O_3$.

dL

§ 21.



).

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l}, \quad (21.2)$$

$$\epsilon' = \frac{\Delta d}{d},$$

l
S (. 36),

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 \quad (F_1 = F_2 = F),$$

Δl

Δl

$$\epsilon' = -\mu\epsilon,$$

μ

1703)

(1635—

$$\sigma = - \quad (21.1)$$

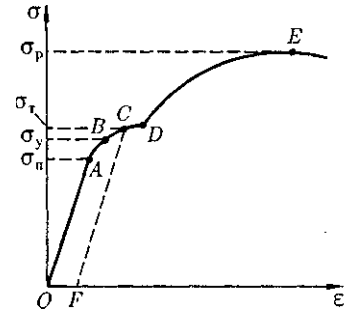
$$\sigma = E\epsilon, \quad (21.3)$$

(1781—1840) —

(21.3)

(21.2), (21.3) (21.1)

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{ES}$$



$$F = \frac{ES}{l} \Delta l = k \Delta l, \quad (21.4)$$

(≈ 0,2 %),
(σ_τ) —
CD

(21.4)

« ».

()

(D)

(.37).

(σ_p).

σ(ε),

(,).

на-

(() (σ_y))

()

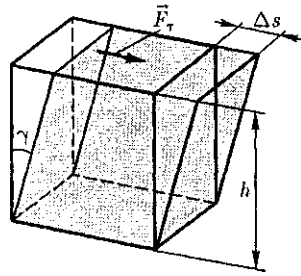
$$\Pi = A = \int_0^{\Delta l} F dx,$$

OA, прямой CF, появля-

(21.4), $F = kx = \frac{ES}{l} x,$

$$\Pi = \int_0^{\Delta l} \frac{ES}{l} x dx = \frac{1}{2} \frac{ES}{l} (\Delta l)^2,$$

$$(\Delta l)^2.$$



.38

F_{τ} (.38),
(

).

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\Delta s}{h},$$

Δs —

; h —

$$\operatorname{tg} \gamma \approx \gamma).$$

(

?

вращательном

?

.

,

?

МОМЕНТОМ

?

?

?

?

?

?

?

?

?

свободные

(

)?

?

?

?

?

$\sigma(\epsilon)$. Что

?

?

4.1.

: 1)

[1] 14/15; 2) 14/15]

; 2)

- 4.2. $F = 100$, $R = 0,5$ =
- = 2 • 12 / ². [32] , ,
- 4.3. , $m_1 = 1$ = 1
; 2) $m_2 =$
- 2 . , : 1)
- $\frac{T_2}{T_1}$. [1) 2,8 / ²; 2) 1,11]
- 4.4. , $t = 1$ $2 \text{ кг} \cdot \text{ }^2$,
 $n_1 = 300 \text{ мин}^{-1}$ $n_2 =$
- = 180 "1. : 1) ; 2) ;
- 3) . [1) 0,21 / ²; 2) 0,42 • ; 3) 630]
- 4.5. — 80 ,
- = 100 ,
= 10 "1, , n_2 ,
- . [26 ¹]
- 4.6. 62,1 . , 1 ²,
= 69 . [$\frac{\Delta l}{l} = \sqrt{\frac{2A}{ESl}} = 0,03$]

5

§ 22.

XVI . (1473 — 1543)

(. § 5),

()

(II . . .),

XVII

() ,

(

1571 — 1630),

1601),

1.

2.

3.

(),

G

(1731 1810).

. 39.

= 729

= 158

(m_1 m_2)

(r^2):

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (22.1)$$

()

G.

G—

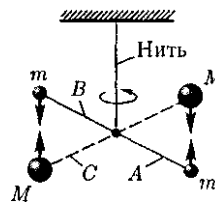
G—

$6,6720 \cdot 10^{-11} \cdot \text{M}^2/\text{KГ}^2, \dots$

1

. 39

(22.1)



$6,6720 \cdot 10^{-11}$ Н.
 G показывает,

— ; R —
 , R₀ — h

§ 23.

$$P = G \frac{mM}{(R_0 + h)^2},$$

широтой

поверхности
 $9,832 / ^2$ $9,780 / ^2$

a, g.

— (≠ , N,

6378

6357).

$$\vec{N} + \vec{P} = m\vec{a}.$$

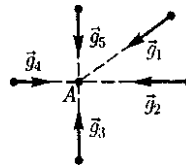
9,81 / ^2.

$$\vec{P}' = -\vec{N} = \vec{P} - m\vec{a} = m\vec{g} - m\vec{a} = m(\vec{g} - \vec{a}),$$

и P' — , a = 0

$$P = mg = F = G \frac{mM}{R^2},$$

' = 0, = g



§ 24.

(22.1)

(. 41).

§ 25.

R (. 41) m

$\vec{F} = m\vec{g}$. (24.1)

и

$F = G \frac{mM}{R^2}$,

dR

$dA = -G \frac{mM}{R^2} dR$. (25.1)

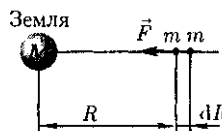
« \leftrightarrow »

. 41).

, если

(A),

(. 40).



. 41

R_1 R_2 ,

$$A = \int_{R_1}^{R_2} dA = - \int_{R_1}^{R_2} G \frac{mM}{R^2} dR =$$

$$= m \left(\frac{GM}{R_2} - \frac{GM}{R_1} \right). \quad (25.2)$$

M ,

$$\varphi = - \frac{GM}{R}, \quad (25.4)$$

R —

$$(25.4)$$

(§ 12).

$$(12.2),$$

$$(R = \text{const}).$$

«→»

(φ)

PI

$$A = -\Delta\Pi = -(\Pi_2 - \Pi_1) = \Pi_1 - \Pi_2. \quad (25.2)$$

(25.1)

(25.4)

dA ,

$$\Pi_1 - \Pi_2 = -m \left(\frac{GM}{R_1} - \frac{GM}{R_2} \right). \quad (25.3)$$

$$dA = -m d\varphi.$$

$$, dA = F dl (dl -)$$

$$\left(\lim_{R_2 \rightarrow 0} \Pi_2 = 0 \right). \quad R_2 \rightarrow \infty \quad (25.3)$$

$$(24. 1), dA = mg dl, \text{ т. е. } mg dl = -m d\varphi, \text{ или}$$

$$, = -G \frac{mM}{R_1}.$$

$$g = - \frac{d\varphi}{dl}.$$

$$\frac{d\varphi}{dl}$$

$$\Pi = -G \frac{mM}{R}.$$

$$\varphi = \frac{\Pi}{m}$$

$$\vec{g} = -\text{grad} \varphi, \quad (25.5)$$

$$\text{где } \text{grad} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k} - \text{гра-}$$

$$\varphi [\quad . (12.5)]. \quad \leftrightarrow$$

(25.5)

$$G \frac{mM}{r^2} = \frac{mv_1^2}{r}.$$

$r \approx R_0$ (

$$) - \frac{GM}{R_0^2} [\dots (25.6)],$$

$$v_1 = \sqrt{gR_0} = 7,9 \text{ км/с.}$$

$$\Pi = -G \frac{mM}{R_0+h} - \left(-G \frac{mM}{R_0} \right) = G \frac{mMh}{R_0(R_0+h)},$$

R_0 —

$$P = G \frac{mM}{R_0^2} \text{ и } g = \frac{P}{m} = G \frac{M}{R_0^2},$$

то, учитывая условие $h \ll R_0$, получаем

$$\Pi = G \frac{mMh}{R_0^2} = mgh.$$

(12.7),

§ 26.

$$\frac{mv_2^2}{2} = - \int_{R_0}^{\infty} G \frac{mM}{r^2} dr = G \frac{mM}{R_0},$$

откуда

$$v_2 = \sqrt{2gR_0} = 11,2 \text{ км/с.}$$

$$v_3 = 16,7 \text{ / .}$$

$$\frac{v_1^2}{r}.$$

$$(10.3), \quad F = (\dots),$$

$$m\vec{a}' = m\vec{a} + \vec{F}_{\text{ин}}$$

1957 г.,
1959 г.

1961 г. : 1)

; 2)

; 3)

§ 27.

(§ 5, 6), **1.**

(. 42).

T .

a_0 ,

$F =$

$$+ T$$

$$F a_0$$

$$a_0 \text{ и}$$

$$($$

$$a_0) \quad F = mg \operatorname{tg} \alpha =$$

$$-ma_0,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_0}{g},$$

$F_{\text{ин}}$

F ,

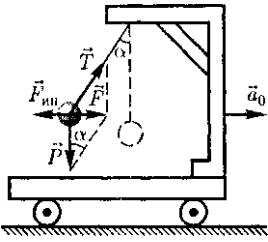
\vec{a}'

\vec{F}

$F_{\text{ин}}$

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}} \quad (27.1)$$

.42



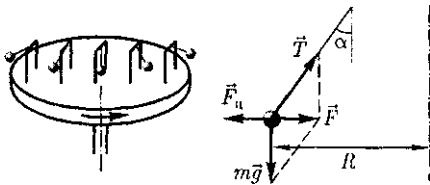
$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a}_0. \quad (27.2)$$

лей.

2.

$$\omega (\omega = \text{const})$$

(.43).



.43

72 (

).

$$F = m\omega^2 R_{\text{и}}$$

$$T: F = + T.$$

$$F =$$

$$= mg \operatorname{tg} \alpha = m\omega^2 R,$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega^2 R}{g},$$

R

ω.

отсчета,
, шарик
F

F_ц

F_ц

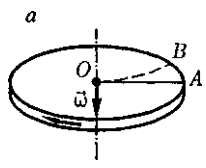
$$F_{\text{ц}} = -m\omega^2 R.$$

(27.3)

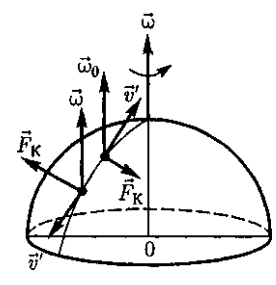
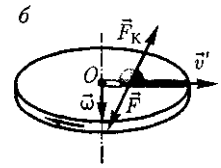
(27.3)

R,

ω



.44



3.

$v' = \text{const}$, $v' \perp \omega$.
 $(v' = \text{const},$

(. 45),

(27.4),

по v' (. 44,)

v' .

v' (. 44,)

стержень \vec{F} .

прямолинейно, F

новешивается приложенной \vec{F}_K

v' **кориолисовой** 100).

$$\vec{F}_K = 2m[v' \vec{\omega}]. \quad (27.4)$$

F_K
 v'

ω

1 (1792—1843) —

(27.1),

$F_{ин}$

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{\text{ин}} + \vec{F}_{\text{и}} + \vec{F}_{\text{К}}$$

(27.2) (27.4).

« »

», « »

?

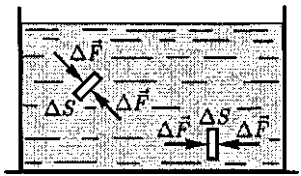
§ 28.

...
 AS AF,
 AS,
 (. 46).

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

к
 1
 1² (1 = 1 / ²).

Рис. 46



(1623—1662) —

$$= \rho g S h,$$

$$p = \frac{P}{S} = \frac{\rho g S h}{S} = \rho g h, \quad (28.1)$$

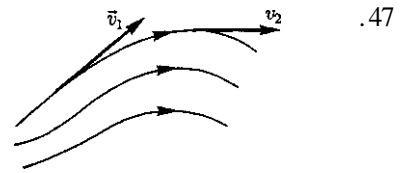
линейно
 $\rho g h$ называется
 (28.1),

(),

():

§29.

(. 47).



называется

(),

S_1 S_2 ,

(. 48).

Δt

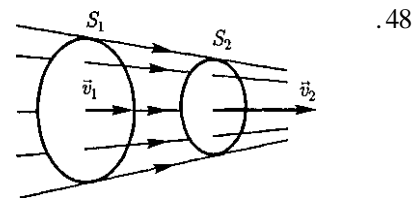
$S v \Delta t$;

S

$\frac{1}{S_1 v_1}$, $\frac{S_1}{v_1}$ —

S_1 .

S_2 1



$$S_2 v_2 = S_1 v_1 = \text{const.} \quad (29.1)$$

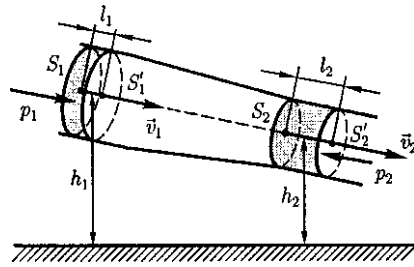


Рис. 49

(29.1)

ся

$$E_2 - E_1 = A, \quad (30.1)$$

E_1 и E_2 —

S_1 и S_2

§ 30.

S_1 и S_2 ,

от S_1 S_1' At

$$l_1 = v_1 \Delta t, \quad l_2 = v_2 \Delta t.$$

рис. 49,

$$A = F_1 l_1 + F_2 l_2, \quad (30.2)$$

$$F_1 = p_1 S_1 \text{ и } F_2 = p_2 S_2$$

рис. 49). E_1 и E_2

S_1 и S_2 ,

(. 49).

p_1

S_1

v_1 ,

h_1 .

p_2 ,

S_2

v_2 ,

h_2 .

S_1'

$\frac{\Delta t}{S_1}$ к

S_1'

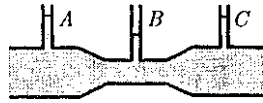
S_2

$$E_1 = \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1, \quad (30.3)$$

$$E_2 = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2. \quad (30.4)$$

$E_2 - E_1$

Рис. 50



$$\begin{aligned} (30.3) \quad (30.4) \quad (30.1) \\ (30.1) \quad (30.2), \end{aligned} \quad (30.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{mv_1^2}{2} + mgh_1 + p_1 S_1 v_1 \Delta t = \\ = \frac{mv_2^2}{2} + mgh_2 + p_2 S_2 v_2 \Delta t. \end{aligned} \quad (30.5)$$

(29.1),

$$\begin{aligned} \Delta V = S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t. \\ (30.5) \quad \Delta V, \end{aligned}$$

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2, \quad (30.7)$$

(29.1)

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const.} \quad (30.6)$$

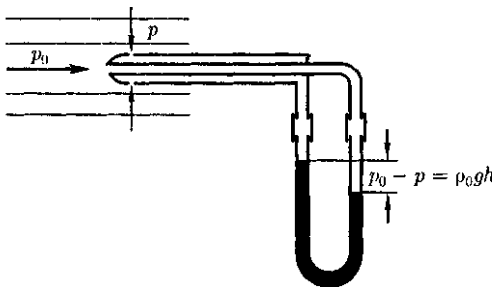
(30.6)

1782;

1738 .)

(1700—

(. 50).



(),

(. 51).

.51

(),
 ().

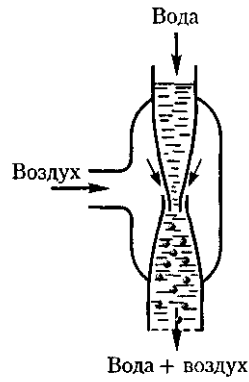
$$p_0 - p = \rho_0 gh, \quad (30.8)$$

$$p_0 - p = \frac{\rho v^2}{2}.$$

(30.8) (30.9)

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_0 gh}{\rho}}$$

(. 52).



h_1

h_2

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho gh_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho gh_2 + p_2.$$

p_1 p_2

, . . $p_1 - p_2$,

$$\frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + gh_2.$$

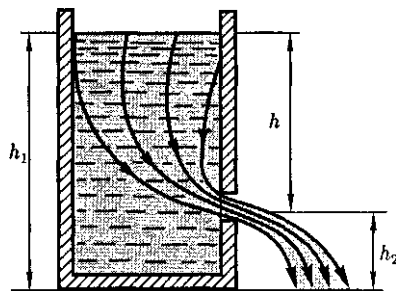
(29.1)

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{S_1}{S_2}, \quad S_1 \text{ и } S_2 -$$

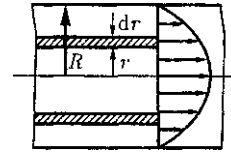
$$S_1 \gg S_2, \quad \frac{v_1^2}{2}$$

(1 . . = 133,32) . 100

(. 53).



.53



$$P = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \left(- \right), \quad F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho' g$$

$$F = 6\pi\eta r v \left(r - \right), \quad v -$$

$$P = F_A + F$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho' g + 6\pi\eta r v,$$

$$v = \frac{2(\rho - \rho')gr^2}{9\eta}.$$

2.

dr (. 56).
[. (31.1)],

$$F = -\eta \frac{dv}{dr} dS = -\eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr},$$

dS — ; «» ,

$$-\eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr} = \Delta p \pi r^2, \quad dv = -\frac{\Delta p}{2\eta l} r dr.$$

$$v = -\frac{\Delta p}{4\eta l} (R^2 - r^2).$$

. 55). t

$$V = \int_0^R vt \cdot 2\pi r dr = \frac{2\pi t \Delta p}{4\eta l} \int_0^R r(R^2 - r^2) dr =$$

$$= \frac{\pi t \Delta p}{2\eta l} \left[\frac{r^2 R^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R = \frac{\pi R^4 t \Delta p}{8\eta l},$$

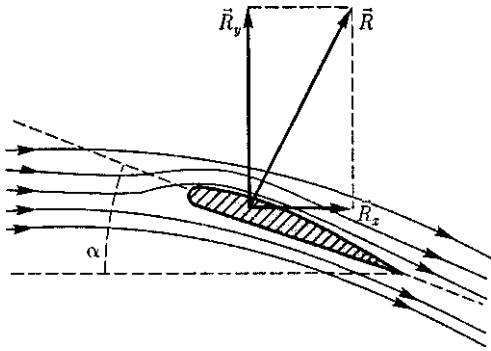
откуда вязкость

$$\eta = \frac{\pi R^4 t \Delta p}{8Vl}.$$

Эта формула называется **формулой Пуазейля**.

§ 33.

(1799 1868)



.57

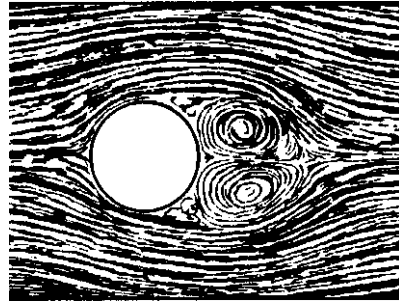
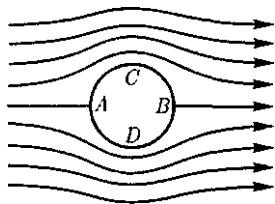


Рис.59

прямои,
 D ,
 жидкости (R),
 (R_x) ,
 (R_y) ,
 (.57).

прямои,
 D ,
 жидкости (R),
 (R_x) ,
 (R_y) ,
 (.57).
 Если
 ()
),
 (),

.58



(.59).

тела

C_x

$$R_x = C_x \frac{\rho v^2}{2} S, \quad (33.1)$$

p — ; S — ; v — [()]; . . . 57].

R_x

$$= \overline{C_x},$$

(33.1):

$$R_y = C_y \frac{\rho v^2}{2} S,$$

C_y —

«

(1847 1921). »

? ? — ?

? ? ?

?

? ?

?

?

? ?

?

()

?

?

(. . . 57)?

6.1. (= 7,87 / ³) 5 , (' = 1 / ³) —

3 . [139 ³]

6.2. $S = 1 \frac{2}{t}$, $V = 3 \frac{3}{t}$

$$[t = \frac{1}{S_1} \sqrt{\frac{2SV}{g}} = 13] \quad S_1 = 10 \frac{2}{t}$$

6.3. $d_1 = 5$, $d_2 = 2$.
 $I = 1M$.
 1) ; 2)

$3,1 \cdot 10^{-3} M^3/c; 2) = pgh + \rho gH \left[1 - \frac{d_2^4}{d_1^4} \right] = 58,3$]

6.4. поверхности, $h_1 = 64$, $h_2 = 25$.
 [80] по

6.5. $(\rho' = 2,7 / ^3)$, 1 .
 [16 •]

6.6. $h_1 = 5$, $d = 2$, $l = 1$.
 $\eta = 0,1$, $h_2 = 80$, $= 0,9 / ^3$.

$[s - d^2 \rho h^2 \sqrt{ } = 8,9$]

6.7. скорость, $(\rho' = 9 / ^3) = 20$. C_x
 $(= 1,29 / ^3)$
 $0,5. [94 /]$

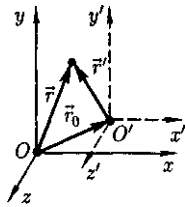
7

()

§ 34.

t
 ; u
 ; z , OO'
 O_B ; $\vec{r}_0 = \vec{u}t$.

(; z'), $u (\vec{u} = \text{const})$.
 $\vec{r} = \vec{r}' + \vec{r}_0 = \vec{r}' + \vec{u}t$. (34.1)



(34.1)

$$\begin{aligned}
 x &= x' + u_x t, & y &= y' + u_y t, \\
 z &= z' + u_z t. & & (34.2)
 \end{aligned}$$

(34.1) (34.2)

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(\vec{v}' + \vec{u})}{dt} = \frac{d\vec{v}'}{dt} = \vec{a}'$$

и ;

$$\vec{a} = \vec{a}' \quad (34.5)$$

$$(34.5), \quad \vec{a}' = 0, \dots$$

$$(34.5) \quad F = \dots$$

$$x = x' + vt, \quad y = y', \quad z = z'.$$

(34.2)

$$t = t'. \quad (34.3)$$

(\ll),

(§ 36).

$$(34.1) \quad [\quad (34.3)],$$

$$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{u}, \quad (34.4)$$

§ 35.

()

¹ (1853—1928) —

$(v \ll c)$.

XIX .

1887 .

(1852 1913)

1881 .,

, 1838—1923)

() —

§ 175).

»

(

(. § 139)

, 1831 —1879),

$(v \ll c)$.

§ 19).

I.

(. § 13),

(. § 9)

1905 .

*инварианты*¹

II.

(механические, электродинамические, ...)

... : (... , , z) ' (; ; z'), () v = const (. 61). t = t' = 0, O ' ,

, постоянство

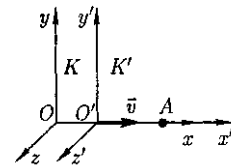
K (. . 61), $x = ct,$ (36.1)

$x' = ct',$ (36.2)

(36.2), (36.1)

$x' - x = c(t' - t),$ ' ≠ (,), $t' ≠ t,$

§ 36.



. 61

$$\begin{array}{l}
 K \rightarrow K' \\
 \left\{ \begin{array}{l} x' = x - vt, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = t, \end{array} \right.
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 K' \rightarrow K \\
 \left\{ \begin{array}{l} x = x' + vt, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = t', \end{array} \right.
 \end{array}$$

(3 ≪ 1,

(36.3) x, t, x', t'

v ВДОЛЬ ОСИ x).

1904 ..

(. § 139)

(36.3)]

$$\begin{array}{l}
 K \rightarrow K' \\
 \left\{ \begin{array}{l} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y' = y, \\ z' = z, \\ t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{array} \right.
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 K' \rightarrow K \\
 \left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \\ y = y', \\ z = z', \\ t = \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \end{array} \right.
 \end{array}
 \qquad
 (36.3)$$

$\beta = \frac{v}{c}$.

§37.

1.

(37.3) τ и τ' $\approx 2,2 \cdot 10^{-8}$ с, π -МЕЗОНЫ, ≈ 30 м, $\approx 6,6$ м.

«...» (...)

π -мезона $\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1-\beta^2}}$,
 500 м (...)
 500 м), $(\sqrt{1-\beta^2} = 0,001)$.
 Так как $\beta \approx 1$, то $v\tau' \gg c\tau$.

1000 м, $x'_2 - x'_1 = x_2 - x_1 - vt$, $x'_1 = x_1 - vt'$

близнецов,

v.

x_1 и x_2 в

K

t.

$l = x_2 - x_1$

инерциальных.

(36.3),

инерциальна,

$$l'_0 = x'_2 - x'_1 = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1-\beta^2}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1-\beta^2}},$$

совершенно

$$l'_0 = \frac{l}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad (37.4)$$

π -ме-

$$dx = \frac{dx' + v dt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad dy = dy', \quad dz = dz',$$

$$dt = \frac{dt' + \frac{v}{c^2} dx'}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

получаем

$$\begin{array}{c} K \rightarrow K' \\ \left[\begin{array}{l} u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{v}{c^2} u_x}, \\ u'_y = \frac{u_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v}{c^2} u_x}, \\ u'_z = \frac{u_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \frac{v}{c^2} u_x}, \end{array} \right. \end{array} \quad \begin{array}{c} K' \rightarrow K \\ \left[\begin{array}{l} u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}, \\ u_y = \frac{u'_y \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}, \\ u_z = \frac{u'_z \sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x}. \end{array} \right. \end{array} \quad (37.5)$$

$$(37.4)$$

$$\sqrt{1 - \beta^2}$$

$$(36.3)$$

$$y'_2 - y'_1 = y_2 - y_1 \text{ и } z'_2 - z'_1 = z_2 - z_1,$$

4.

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{v}{c^2} u}, \quad u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'}. \quad (37.6)$$

$$u_x = \frac{dx}{dt}, \quad u_y = \frac{dy}{dt}, \quad u_z = \frac{dz}{dt} \text{ и}$$

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'}, \quad u'_y = \frac{dy'}{dt'}, \quad u'_z = \frac{dz'}{dt'}$$

$$x', y', z'$$

$$(36.3),$$

(§ 35).
 (37.6)
$$s_{12} = \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c^2} c} = \dots$$

(38.1)
$$s_{12} = \sqrt{c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2},$$

где $\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = l_{12}$

$$t_{12} = t_2 - t_1,$$

$$s_{12} = \sqrt{c^2 t_{12}^2 - l_{12}^2}.$$

$$u' = v = \dots$$

 (37.6)

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_2 - t_1, \Delta x = x_2 - x_1, \Delta y = y_2 - y_1 \\ \Delta z &= z_2 - z_1, \end{aligned} \quad (38.1)$$

$$s_{12}^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2.$$

(§ 189).

$$(s'_{12})^2 = c^2(\Delta t')^2 - (\Delta x')^2 - (\Delta y')^2 - (\Delta z')^2. \quad (38.2)$$

§ 38.

(36.3),

$$\Delta x' = \frac{\Delta x - v \Delta t}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad \Delta y' = \Delta y, \quad \Delta z' = \Delta z,$$

$$\Delta t' = \frac{\Delta t - \frac{v}{c^2} \Delta x}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Подставив эти значения в (38.2), после элементарных преобразований получим, что $(s'_{12})^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2$, т. е.

$$(s'_{12})^2 = s_{12}^2.$$

§ 39.

(. § 35),

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

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \left(\frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \vec{v} \right), \quad (39.1)$$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad (39.2)$$

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (39.3)$$

$$(\dots) \quad (39.2)$$

$$(\dots) \quad (6.7).$$

(§ 12):

$$dT = dA.$$

$$dT = d \left(\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right).$$

(39.3) (39.1)

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + C.$$

(39.1)
(6.5)]

$v = 0$

$$C = -mc^2.$$

($v \ll c$)

$v \ll c$ (\sim

$$T = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right). \quad (40.1)$$

$c \rightarrow \infty$).

(40.1)

$v \ll c$

).

$$T = \frac{mv^2}{2} \quad (40.2)$$

§ 40.

(разлагая в ряд $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots$ при $v \ll c$,

).

$$d\vec{r} \quad dA = \vec{F} d\vec{r} = \vec{F} \vec{v} dt = \vec{v} d\vec{p} [$$

(39.2)].

$$dA = \frac{mv dv}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{3/2}} = d \left(\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

(

).

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (40.3)$$

(40.3)

($v = 0$)

$$E_0 = mc^2. \quad (40.4)$$

(40.4),

$$E_0$$

$$E_0 = mc^2.$$

Am

(40.3),

$$\frac{E_0}{v=0}$$

$$\Delta E_0,$$

$$\Delta E_0 = c^2 \Delta m. \quad (40.9)$$

(40.9)

покоя.

$$^2 - p^2 c^2 = \text{inv},$$

и

):

$$E^2 - p^2 c^2 =$$

$$= \frac{m^2 c^4}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{m^2 v^2 c^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m^2 c^4 = E_0^2 \quad (40.5)$$

[(39.3), (40.3) (40.4)].

(40.5),

$$^2 - ^2 = ^2,$$

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

$$E^2 = E_0^2 + p^2 c^2. \quad (40.6)$$

(40.3), (40.1) (40.4)

$$E = T + E_0 = T + mc^2, \quad (40.7)$$

(40.7) (40.6),

$$pc = \sqrt{T(T + 2mc^2)}, \quad (40.8)$$

$$T \ll mc^2$$

(40.8)

$$(p = \sqrt{2mT}), \quad T \gg mc^2$$

$$p = \frac{T}{c}.$$

», « — , .
 , .
 ? ? ? ? ? ?

? ;
 ? , ?
 ?
 25 % ?
 « » ? ?
 ? ?
 ? ?
 ? ? ?
 ? ? ? ?

7.1.

(, (,)

$$\theta = 30^\circ \cdot [l_0 = l \sqrt{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \sin^2 \theta\right) \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} = 1,53 \text{ м}]$$
 I = 1
 1,5 %

7.2.

$$\beta = \frac{v}{c} \cdot [0,172]$$

7.3. 2 200 / ;

; 2) 200 / ; 1) ;
[1) 277 / ; 2) 5,2]

7.4. , ,

π -МЕЗОН
 $At = 5$, $t_0 = 2,2$.

[1,35]

7.5. , [0,98 c]

7.6. 1,2 . [2,86 /] ,

7.7. ,
1 ГэВ. [5,34 · 10⁻¹⁹ H · c]

§41.

XIX . (1822—
 1888), . . .
 — , , .
 , , .
 : , .
) (, .
 , — , .
 , — (, . .) ,
 , , , .
 , , .
 (460—370 . .). XVII . ,
 . . .

XI

(1960)

()
(°).

100 ° ($1,013 \cdot 10^5$) . 0

609

273,16 () .

273,15 (

),

() .

$$= 273,15 + t$$

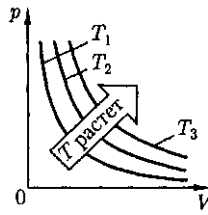
$$= 0$$

() —

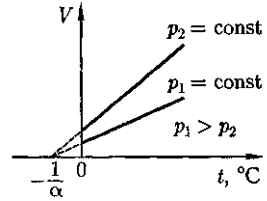
0

v—

$$= \text{const}, \quad v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}.$$



.62



.63

$$pV = \text{const} \quad (41.1)$$

при $T = \text{const}$, $m = \text{const}$.

1)

(.62).

2:1)

2)

$$V = V_0(1 + \alpha t) \quad (41.2)$$

при $p = \text{const}$, $m = \text{const}$.

3)

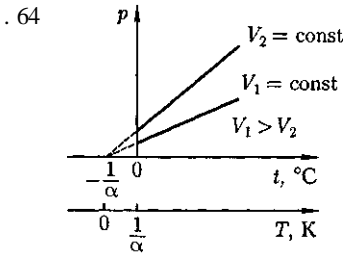
2)

$$p = p_0(1 + \alpha t) \quad (41.3)$$

при $V = \text{const}$, $m = \text{const}$.

$$\alpha = 1/273,15$$

(1627—1691) —
(1620—1684) —
(1778—1850)



(. 63)

(41.2) (41.3)

$$t = -273,15^\circ$$

$$1 + at = 0.$$

(. 64),

$$T = t + \frac{1}{\alpha}.$$

(41.2) (41.3)

$$V = V_0(1 + \alpha t) = V_0 \left[1 + \alpha \left(T - \frac{1}{\alpha} \right) \right] = V_0 \alpha T,$$

$$p = p_0(1 + \alpha t) = p_0 \left[1 + \alpha \left(T - \frac{1}{\alpha} \right) \right] = p_0 \alpha T,$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (41.4)$$

при $p = \text{const}$, $m = \text{const}$,

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (41.5)$$

при $V = \text{const}$, $m = \text{const}$,

1 2

: 1

$$22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}.$$

, 1

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

p_1, p_2, \dots, p_n

$$P = P_1 + P_2 + \dots +$$

§ 42.

—

V

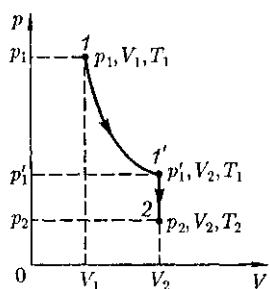
$$f(p, V, T) = 0,$$

(1799—1864)

(1776—1856)—

(1766—1844) —

. 65



(1834—1907)

$$(42.3) \quad p V_m = RT$$

R

$$p V_m = RT \quad (42.4)$$

p_2, V_2, T_2 (. 65).

- 1)
- 2)

(41.1)

$$I - I' = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$$

(41.5)

($p_0 = 1,013 \cdot 10^5$, $T_0 = 273,15$, $V_m = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$):

$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

$$(42.4) \quad 1$$

$$p_1 V_1 = p_1' V_2, \quad (42.1)$$

$$\frac{p_1'}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (42.2)$$

(42.1)

(42.2) p_1' ,

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

I 2

$$\frac{pV}{T}$$

$$\frac{pV}{T} = B = \text{const.} \quad (42.3)$$

(42.3)

$$V = \frac{m}{M} V_m,$$

(/) .

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT, \quad (42.5)$$

$$\nu = \frac{m}{M}$$

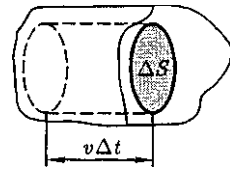
$$k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К.}$$

(42.4)

$$p = \frac{RT}{V_m} = \frac{kN_A T}{V_m} = nkT,$$

$$\left(\frac{N_A}{V_m} = \dots \right) = 2m_0v, \quad m_0 \dots \Delta t \dots \Delta S \dots$$

(42.6)



.66

$$= 2m_0v, \quad m_0 \dots \Delta t \dots \Delta S \dots v\Delta t \dots n\Delta S v \Delta t (n \dots)$$

1

$$N_L = \frac{p_0}{kT_0} = 2,68 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

§ 43.

1/3
(1/)

$$\frac{1}{6} n \Delta S v \Delta t.$$

$$\Delta P = 2m_0v \frac{1}{6} n \Delta S v \Delta t = \frac{1}{3} n m_0 v^2 \Delta S \Delta t.$$

$$\Delta S \dots (66)$$

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta t \Delta S} = \frac{1}{3} n m_0 v^2. \quad (43.1)$$

N
 $v_1, v_2,$

(1821 — 1895) —

..., $v_N,$

$$\langle v_{\text{KB}} \rangle = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2}, \quad (43.2)$$

$$\langle v_{\text{KB}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{m_0 N_A}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \quad (43.7)$$

где $k = \frac{R}{N_A}$ —

(43.2) (43.1)

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{KB}} \rangle^2. \quad (43.3)$$

480 / , — 1900 / .

40 160 / .

$$pV = \frac{1}{3} N m_0 \langle v_{\text{KB}} \rangle^2, \quad (43.4)$$

$$\langle \epsilon_0 \rangle = \frac{E}{N} = \frac{m_0 \langle v_{\text{KB}} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT \quad (43.8)$$

[(43.5) (43.7)]

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m_0 \langle v_{\text{KB}} \rangle^2}{2} = \frac{2}{3} E, \quad (43.5)$$

$$(\quad 0 \quad) \quad (43.8)$$

$$m = N m_0, \quad (43.4)$$

$$pV = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{KB}} \rangle^2.$$

$$\mathbf{1} \quad = \quad (\quad - \quad)$$

$$pV_m = \frac{1}{3} M \langle v_{\text{KB}} \rangle^2,$$

V_m —

$$(43.8)$$

$$pV_m = RT.$$

$$RT = \frac{1}{3} M \langle v_{\text{KB}} \rangle^2,$$

§ 44.

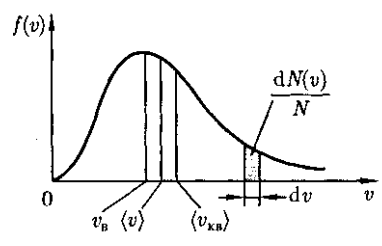
$$\langle v_{\text{KB}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (43.6)$$

$$M = m_0 N_A, \text{ где } m_0 \text{ —}$$

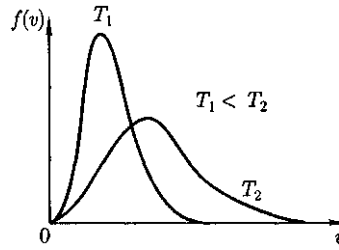
$$\text{, а } N_A \text{ —} \quad (43.6)$$

$dN(v)$,
 $f(v)$
 $() \quad \frac{dN(v)}{N}$,
 $v \quad v + dv, \dots$
 $\frac{dN(v)}{N} = f(v)dv$,
 m_0 ,
 $(= \text{const}), \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$
 $f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv}$.
 $f(v) —$
 $f(v) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$, (44.1)
(44.1)
(1859).
 N
(44.1)
. 67.
житель $e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$ уменьшается быстрее,
 v^2 ,
 $f(v)$,
 v_B
функцией $f(v)$,
рична относительно v_B .
 $\frac{dN(v)}{N}$
 $v \quad v + dv$,
. 67.

Рис. 67



$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1.$$



(44.1) ()

v,

$f(v)$:

$$\frac{d}{dv} \left(v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} \right) = 2v \left(1 - \frac{m_0 v^2}{2kT} \right) e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} = 0.$$

$$v = 0 \quad v =$$

(44.1), a

v,

v_B :

$$v_B = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (44.2)$$

(44.2)

(. 68)

(

).

: 1)

$$v_B = \sqrt{\frac{2RT}{M}}; \quad 2) \text{ средняя } \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = 1,13 v_B; \quad 3)$$

$$\langle v_{\text{кп}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = 1,22 v_B \quad (. 67).$$

$$dN(v) = N \cdot 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} dv, \quad (44.4)$$

ϵ .

v

$$(44.4) \quad v \sqrt{\frac{2\epsilon}{m_0}} \quad \epsilon = \frac{m_0 v^2}{2} \quad dv = (2m_0 \epsilon)^{-1/2} d\epsilon,$$

$$dN(\epsilon) = \frac{2N}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \epsilon^{-1/2} e^{-\frac{\epsilon}{kT}} d\epsilon = N f(\epsilon) d\epsilon,$$

$dN(\epsilon)$ —

$\epsilon + d\epsilon$.

(v)

(

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v dN(v) = \int_0^{\infty} v f(v) dv.$$

$f(v)$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (44.3)$$

$$f(\epsilon) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \epsilon^{1/2} e^{-\frac{\epsilon}{kT}}.$$

(ϵ)

$$\langle \epsilon \rangle = \int_0^{\infty} \epsilon f(\epsilon) d\epsilon =$$

$$= \frac{2}{\sqrt{\pi}} (kT)^{-3/2} \int_0^{\infty} \epsilon^3 e^{-\frac{\epsilon}{kT}} d\epsilon = \frac{3}{2} kT,$$

(43.8).

§ 45.

Больцмана

$$p - (p + dp) = \rho g dh,$$

$$-dp = \rho g dh,$$

$$dp = -\rho g dh. \quad (45.1)$$

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

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}.$$

(45.1),

$$dp = -\frac{Mg}{RT} p dh, \text{ или } \frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dh.$$

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} \int_{h_1}^{h_2} dh, \quad \ln \frac{p_2}{p_1} = -\frac{Mg}{RT} (h_2 - h_1)$$

$$p_2 = p_1 e^{-\frac{Mg(h_2 - h_1)}{RT}}. \quad (45.2)$$

(45.2)

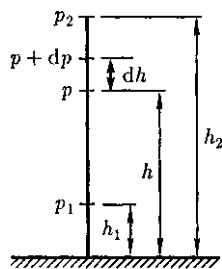
(45.2)

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (45.3)$$

h .

$$p + dp \left(\frac{dh > 0}{dh} \frac{dp}{dp} < \dots \right)$$

69



$$(45.3).$$

$$(45.3)$$

$$(42.6) p = nkT:$$

$$n = n_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}},$$

где n — концентрация молекул на высоте h , n_0 — то же, на высоте $h = 0$.

Так как $M = m_0 N_A$ (N_A — постоянная Авогадро, m_0 — масса одной молекулы), а $R = kN_A$, то

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 g h}{kT}}, \quad (45.4)$$

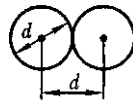
$m_0 g h$ —

$$n = n_0 e^{-\frac{\Pi}{kT}}. \quad (45.5)$$

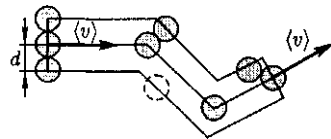
$$(45.5)$$

$$(45.5)$$

§ 46.



.70



.71

$$\langle z \rangle = nV, \quad ; V = \dots$$

$$= \pi d^2 \langle v \rangle \dots$$

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

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

80

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

.. $\langle l \rangle$

(42.6)

$$\frac{\langle l_1 \rangle}{\langle l_2 \rangle} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{p_2}{p_1}.$$

§ 47.

2.

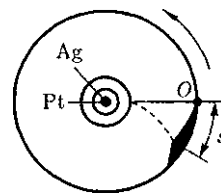
(1888 1970).

. 72.

1.

(1827)

(1773 1858) —



.72

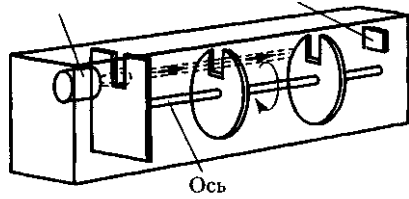


Рис. 73

s.

4.

[(45.4),
(1870—1942)

s,

3.

больцмановское

.73.

$$n = n_0 e^{\frac{(m-m_1)gh}{kT}},$$

где m — масса частицы, m_1 — масса вытесненной ею жидкости; $m = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho$, $m_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_1$ (r — радиус частицы, ρ — плотность частицы, ρ_1 — плотность жидкости).

Если n_1 и n_2 — концентрации частиц на уровнях h_1 и h_2 , $k = \frac{R}{N_A}$, то

$$N_A = \frac{3RT \ln \frac{n_1}{n_2}}{4\pi r^3 (\rho - \rho_1) g (h_2 - h_1)}.$$

N_A

(45.4).

«↔»

§ 48.

$$\left(j_E \text{PI} \frac{dT}{dx} \right) X$$

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (48.2)$$

c_V —

гид),

1); — 1; $\langle v \rangle$ —

$\langle l \rangle$ —

2.

1.

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}, \quad (48.1)$$

j_E —

теплопроводность; $\frac{dT}{dx}$ — $x; X$ —

« »

$$\eta \frac{dv}{dx} \quad ($$

Фика:

$$j_m = D \frac{da}{dx}; \quad (48.3)$$

$$j_m =$$

$$x; D \frac{da}{dx} \quad (48.5)$$

$$j_p = -\eta \frac{dv}{dx}, \quad (48.6)$$

«↔»

$$j_p =$$

$\frac{dp}{da};$

$$j_m = D \frac{da}{dx}$$

$$\frac{dv}{dx}$$

$$D = \frac{1}{2} \langle v \rangle \langle l \rangle. \quad (48.4)$$

3.

$$\left(\frac{dv}{dx} \right)$$

(),

B

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

(48.1),

(48.3) (48.6),

(31.1),

()

$$\frac{dv}{dx} S, \quad (48.5)$$

низкий ($\langle l \rangle \ll d$), $\langle l \rangle \leq$
 $\leq d$, ($\langle l \rangle > d$)
 $(\langle l \rangle \gg d)$
 называется

X, D η.

мулы (48.2), (48.4) (48.7)

вакуумные

() ≈ 0,13

пасосы

X, D и :

$$\eta = \rho D, \quad \frac{\lambda}{\eta c_V} = 1.$$

($10^{-7} - 10^{-11}$ 13,3 — 1,33
 . .).

] =

. 74.

насаженный
 I и I'

§ 49.

2,

3,

странство 3

I

4.

I'

3

4

5

. 74

(I)

d

(I) d pa



(—),

(.76).
()

1—2

,

.

(.75).

(,)

1,

2

300 ° .

().

,
»,

«

3),

(

(

),

7

«

».

(1 2)
,

(

«

»,

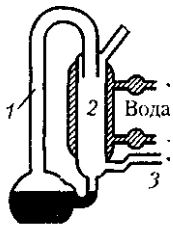
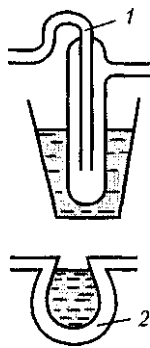
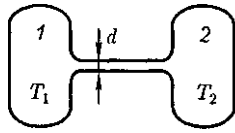


Рис. 75

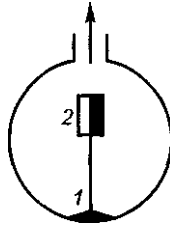


.76

(1842—1923) —



.77



.78

$$n_1 \langle v_1 \rangle = n_2 \langle v_2 \rangle, \quad (49.1)$$

где n_1 и n_2 — концентрации молекул в обоих сосудах, $\langle v_1 \rangle$ и $\langle v_2 \rangle$ — средние скорости молекул. Учитывая, что $n = \frac{p}{kT}$ и $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$, из условия (49.1) получаем

$$\frac{p_1}{p_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}, \quad (49.2)$$

ДВОИНЫЕ

(
1 2,

(.78)

2,

1

T_1 T_2 (.77)

(49.2)

$\langle l \rangle \ll d$,

$(p_1 = p_2)$.

$\langle l \rangle \gg d$,

()

?

?

?

—

?

?

?

1

1

20
?

?

?

молекулярно-кинетиче-

?

?

?

- ,зная распределения ? ,
- ? ?
- ?
- ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?

8.1.

и V_1 и V_2 и V_3 .

8.2. $m_1 = 16$ — 20° $m_2 = 21$. $= 0,2 \text{ МПа}$. $[2,5 / \text{ }^3]$

8.3. 40 $0,35 / \text{ }^3$. $[478 / \text{ }^3]$,

8.4. $u(u = \text{---})$. $f(u) =$

$$= \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2}$$

8.5.

($t = 0^\circ$, 8.4), $100 / \text{ }^3$. $[0,4]$,

8.6. ? , 273 . $[55 \text{ }^3]$

8.7. 300 5 .

$0,28 \text{ нм}$. $[170 \text{ нс}]$

8.8.

$$1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с} \quad 8,5 \quad \cdot \quad . [1,25 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}]$$

9

§50.

$U =$
 ()
 () ,
 ()

(i = 5).
(. 79,)

§ 1

1/3 $\langle \varepsilon_0 \rangle$ (43.8):

(. 79,)

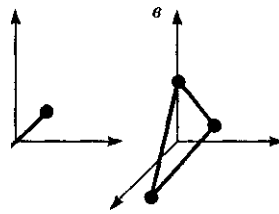
$$\langle \varepsilon_1 \rangle = \frac{\langle \varepsilon_0 \rangle}{3} = \frac{1}{2} kT.$$

вать ($r \rightarrow 0, J = mr^2 \rightarrow 0, T_{\text{вр}} = \frac{J\omega^2}{2} \rightarrow 0$).

79,).

$-kT,$

(,



. 79

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

i —

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{колеб}}$$

;

$$U_m = \frac{i}{2} kTN_A = \frac{i}{2} RT. \quad (50.1)$$

$$U = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT = \nu \frac{i}{2} RT.$$

$$\nu = \frac{m}{M}$$

§51.

$$AU = U_2 - U_1$$

§ 52.

ИЛИ

$$AU = Q \quad (51.1)$$

$$Q = \Delta U + A \quad (51.1)$$

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (51.2)$$

$$\delta A = Fdl = pSdl = p dV \quad (52.1)$$

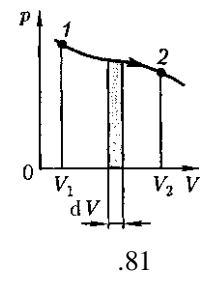
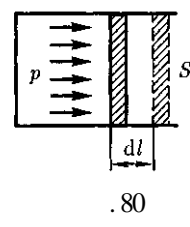
$$dQ = dU + dA$$

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (51.2)$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (52.2)$$

$$AU = 0$$

$$A = Q$$



81.
 dV совершаемая
 $p dV$, . . .

dV ,
 V_1 V_2 ,
 $= f(V)$ и V_1
 V_2 .

ко

$$= \frac{m}{M} \dots$$

$$C_m = cM, \quad (53.2)$$

ПОСТОЯННЫМ.

$$(51.2) \quad \mathbf{1}$$

$$(52.1) \quad (53.1):$$

$$C_m dT = dU_m + p dV_m. \quad (53.3)$$

$$[\dots (52.1)]$$

$$C_V = \frac{dU_m}{dT}, \quad (53.4)$$

§ 53.

— ,
 1 :
 $= m dT$

[Дж/(кг · К)].

$$C_m = \frac{\delta Q}{\nu dT}, \quad (53.1)$$

V,

$$(50.1), dU_m = R dT,$$

$$C_V = \frac{i}{2} R. \quad (53.5)$$

$$, \quad (53.3)$$

$$C_p = \frac{dU_m}{dT} + \frac{p dV_m}{dT}.$$

$$\frac{dU_m}{dT}$$

) C_V [(53.4)],

— $pV_m = RT$ [(42.4)]
 (= const),

$C_p = C_V + R$. (53.6)

(53.6)

C_p , $C_V = 7/2 R$.

C_V (. 82)

$C_V = 3/2 R$, $C_V = 5/2 R$
 ($7/2 R!$) и при

(53.5), (53.6)

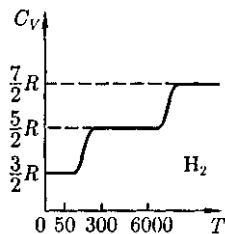
$C_p = \frac{i+2}{2} R$. (53.7)

C_p к C_V :

$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$. (53.8)

(53.5) (53.7)

Рис. 82



§ 54.

(= const).

= const

$$pV = \text{const} \quad (52.2)$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) \quad (54.2)$$

(V = const).

(. 84).

= const

(. 83),

(42.5)

$$pV^{1-\gamma} = \text{const}$$

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1, \quad pV_2 = \frac{m}{M} RT_2,$$

$$\delta A = p dV = 0.$$

$$V_2 - V_1 = \frac{m}{M} \frac{R}{p} (T_2 - T_1). \quad (54.2)$$

§ 53,
($\delta Q = dU +$

$$A = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1). \quad (54.3)$$

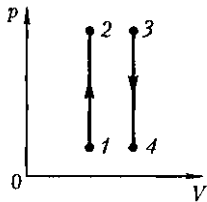
$$\delta Q = dU.$$

(53.4),

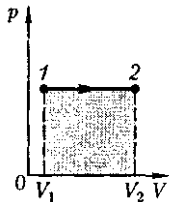
$$dU_m = C_V dT.$$

$$R: \quad T_2 - T_1 = 1, \quad R = \dots$$

$$\delta Q = dU = \frac{m}{M} C_V dT. \quad (54.1)$$



. 83



. 84

$$\delta Q = \frac{m}{M} C_p dT$$

[(53.4)]

$$dU = \frac{m}{M} C_V dT.$$

$$(54.3). \quad (= \text{const}).$$

§ 41,

§ 55.

Бойля—

$$pV = \text{const.}$$

$$= \text{const} \quad (\delta Q = 0).$$

$$\left(\dots \right),$$

$$(52.2) \quad (42.5),$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{M} RT \frac{dV}{V} =$$

$$= \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

$$(\delta Q = dU + \delta A)$$

$$\delta A = -dU, \quad (55.1)$$

$$dU = \frac{m}{M} C_V dT = 0,$$

$$(52.1) \quad (53.4),$$

$$(\delta Q = dU + \delta A),$$

$$(55.1)$$

$$\delta Q = \delta A,$$

$$p dV = -\frac{m}{M} C_V dT. \quad (55.2)$$

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

$$V =$$

$$Q = A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (54.4)$$

$$p dV + V dp = \frac{m}{M} R dT. \quad (55.3)$$

$$(55.2) \quad (55.3)$$

$$\frac{p dV + V dp}{p dV} = -\frac{R}{C_V} = -\frac{C_p - C_V}{C_V}.$$

— = γ [. (53.8)],

$$\frac{dp}{p} = -\gamma \frac{dV}{V}.$$

$V_2,$ p_1 p_2 , V_1

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma \text{ или } p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma.$$

1 2

$$pV^\gamma = \text{const.} \quad (55.4)$$

$$(55.4)$$

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

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.} \quad (55.5)$$

$$T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const.} \quad (55.6)$$

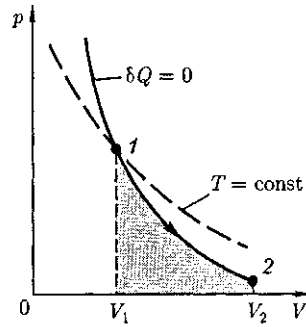
(55.4) — (55.6)

[. (53.8) (53.2)]

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i} \quad (55.7)$$

((Ne, He). (55.8)

$\gamma = 1.4,$ $i = 5,$ $\gamma = 1.67,$ $(\text{H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2)$ $i = 5,$ $\gamma,$ (55.7),



$\delta Q = 0$

(. 85).
($V^\gamma = \text{const}$)
($pV = \text{const}$).

$$(55.1)$$

$$\delta A = -\frac{m}{M} C_V dT.$$

V_1 $V_2,$ то его T_1 T_2

$$A = -\frac{m}{M} C_V \int_{T_1}^{T_2} dT = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2). \quad (55.8)$$

(55.5),

$$(55.8)$$

$$A = \frac{1}{\gamma-1} \left[\frac{p_1 V_1}{M} - \frac{p_2 V_2}{M} \right] = \frac{RT_1 m}{\gamma-1 M}$$

$$= \frac{m}{M}$$

1-2 (

()

85),

особенность —

$$C_p, \quad C_V \text{ и } (dT=0) \text{ с я } \pm$$

($\delta Q=0$)

« »

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

$$pV^n = \text{const}, \quad (55.9)$$

$$-\frac{C - C_x}{C - C_V} : 1)$$

2)

$$= \text{const}$$

, V—

$$= 0, \quad -\gamma$$

(55.9)

$$C = C_p, \quad n = 0 -$$

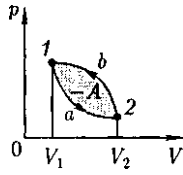
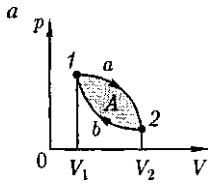
p-V

86).

политропного

(1-2) и

(2-1)



.86

$$\begin{aligned}
 & (dV > 0), \quad (1 \rightarrow 2) \\
 & (dV < 0), \quad (2 \rightarrow 1)
 \end{aligned}$$

$$A = \oint p dV > 0$$

(.86,)

$$\begin{aligned}
 A = \oint p dV < 0 \quad (\\
 (.86,)
 \end{aligned}$$

$$Q = Q_1 - Q_2,$$

$$Q_1 - ; Q_2 - ,$$

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (56.2)$$

§ 57.

1865 .

Q

$$\frac{\delta Q}{T}$$

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0. \quad (57.1)$$

(57.1),

(51.1)

$$Q = \Delta U + A = A, \quad (56.1)$$

$$\frac{\delta Q}{T} = dS. \quad (57.2)$$

$$\frac{\delta Q}{T}, \quad S. \quad (57.1)$$

$$\Delta S = 0. \quad (57.3)$$

$$\Delta S > 0. \quad (57.4)$$

$$(57.3) \quad (57.4)$$

$$(57.3) \quad (57.4)$$

$$\Delta S \geq 0, \quad (57.5)$$

).

$$2, \quad (57.2),$$

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 =$$

$$= \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \int_1^2 \frac{dU + \delta A}{T}, \quad (57.6)$$

$$(57.6),$$

ального газа. Поскольку $dU = \frac{m}{M} C_V dT$,

$$\delta A = p dV = \frac{m}{M} R T \frac{dV}{V}, \text{ то}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{1 \rightarrow 2} &= S_2 - S_1 = \\ &= \frac{m}{M} C_V \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + \frac{m}{M} R \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}, \end{aligned}$$

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = S_2 - S_1 =$$

$$= \frac{m}{M} \left(C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right), \quad (57.7)$$

$$\Delta S_{1 \rightarrow 2}$$

$$1 \quad 2 \\ 1 \rightarrow 2.$$

$$\begin{aligned} \delta Q &= 0, \quad \Delta S = 0, \\ S &= \text{const}, \end{aligned}$$

$$(57.7)$$

$$(T_1 = T_2)$$

$$\Delta S = \frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1};$$

$$(V_1 = V_2)$$

$$\Delta S = \frac{m}{M} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

$$S = k \ln W \quad (57.5)$$

(57.8),

[, $W \geq 1, \dots$ () ()],

(≤ 1).

(1872),

$$S = k \ln W, \quad (57.8)$$

§ 58.

(57.8)

(. § 57),

: ()
 ,
 : ,
 ,
 ,
 (,)
 ,)
 ,

XIX .

(57.8)

:
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,
 ,

1) : $cm a^1$ — :

2) ;
 :
 ,
 $\lim_{T \rightarrow 0} S = 0.$
 1 (1864 1941)

(54.4),

$Q_1,$

$A_{12},$

1 2:

$$A_{12} = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = Q_1. \quad (59.1)$$

2—3

A_{23}

[(55.1) (55.8)]:

$$A_{23} = -\frac{m}{M} C_V (T_2 - T_1).$$

$Q_2,$

$A_{34}:$

$$A_{34} = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = -Q_2. \quad (59.2)$$

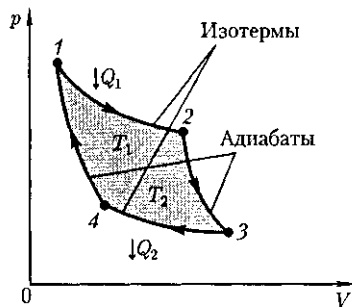
Работа адиабатного сжатия

$$A_{41} = -\frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) = -A_{23}.$$

Работа, совершаемая в результате кругового процесса,

$$\begin{aligned} A &= A_{12} + A_{23} + A_{34} + A_{41} = \\ &= Q_1 + A_{23} - Q_2 - A_{23} = Q_1 - Q_2 \end{aligned}$$

. 89.



. 89

. 89,

1—2 и 3—4,

2—3 4—1.

$U = \text{const},$

(56.2),

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (55.5)$$

2-3 4-1,

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}, \quad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1},$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \quad (59.3)$$

(59.1) (59.2)

(56.2) (59.3),

(59.4),

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{m}{M} R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{m}{M} R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} =$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (59.5)$$

$T_1 \quad T_2$

$$= \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (59.4)$$

(59.5)

()

$$T_2 = 300 \quad \eta = 0,25. \quad T_1 = 400$$

$$50 \quad \eta = 0,5.$$

?

?

?

?

9.6. $p_1 = 0,1$; $\rho = 1,37$; 2) $1,25 \text{ м}^3/\text{кг}$; 1) $V_1 = 1$; 2) V_2 ; p_2 .

9.7. $p_3 = 0,2$; 1) V_2 ; 2) p_2 ; [1] 0,5 ; 2) 0,26 ; $v = 2$; -2 ; $= 2$; [11,5 /]

9.8. 1 ; 2) ; 400 ; 300 ; 1) ; 3) ; [1] 25 % ; 2) 4 ; 3) 3 ; 0,3.

9.9. изотермического ; 300 Д ; [-210] ;

10

§ 60.

непригодна.

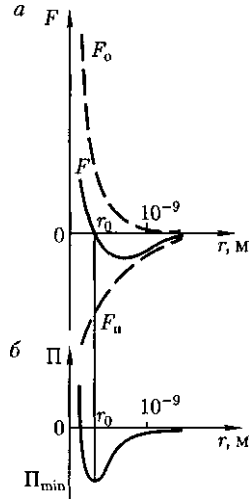
(§ 41),

$\leq 10^{-9}$

XX .,

1^{-3} ; $2,68 \cdot 10^{25}$; 90,

10^{-4} ; 10^{-10}) ; (1 м^3) ; (1 = 101,3) ; $F_{\text{н}}$ — ; F_0 и



, a F—

$$(r \rightarrow \infty), \quad F = 0. \quad (F < 0),$$

$$(60.1), \quad \int_{r_0}^{\infty} F dr > 0.$$

$$r = r_0. \\ r < r_0 \quad (F > 0)$$

$$\int_{r_0}^{\infty} F dr < 0.$$

—, $r = r_0$
 $F = 0, \dots$

r_0 Π_{\min} — Π_{\min}

$r < r_0$ $r > r_0$ $(F > 0)$ $(F < 0)$ $(r = r_0)$
 $r > 10^{-9}$ $(F \rightarrow 0)$ ТОГО,

δA F при $\Pi_{\min} \ll$
 dr

$$\delta A = F dr = -d\Pi. \quad (60.1)$$

$\Pi_{\min} \gg$

(.90,)

$$\Pi_{\min} \approx kT,$$

r_0 .

V_m , а V_m b , — ,

r_0 .

d

сферический

d . . .

2.

Π_{\min}

Π_{\min}

а

()

§ 61.

§ 60,

a —

$$p' = \frac{a}{V_m^2}, \quad (61.1)$$

; V_m —

$$(42.4) p V_m = RT$$

f

):

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT. \quad (61.2)$$

дер-Ваальс (1837—1923)

$$v \quad \left(= \frac{m}{M} \right)$$

$V \rightarrow V_m$,

1.

$$\left(p + \frac{v^2 a}{V^2}\right)\left(\frac{V}{v} - b\right) = RT,$$

ИЛИ

$$\left(p + \frac{v^2 a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT,$$

а и — ; T_K — ; K

b). V_K ; p_K

$$(p_K, V_K, T_K)$$

$$(< T_K)$$

§62.

(61.2)

$$pV_m^3 - (RT + pb)V_m^2 + aV_m - ab = 0. \quad (62.1)$$

(62.1)

V_m — ; (61.2)

V_m ;

1 (

; .91)

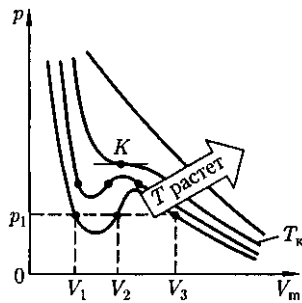
($> T_K$)

V_1, V_2, V_3 (« »)
 p_1), —

T_K

$< T_K$ (.92),
 1-3 и 5-7

.91

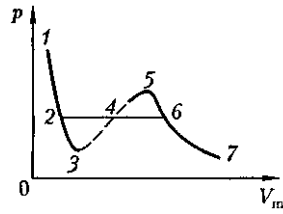


V_m

3-5

3-5

Рис. 92



7-6-2-1.

6-7

2-1 —

6-2,

$$p_k V_k = ab, 3p_k V_k^2 = a, 3p_k V_k = RT_k + p_k b.$$

$$V_k = 3b, p_k = \frac{a}{27b^2}, T_k = \frac{8a}{27Rb}. \quad (62.4)$$

(. . . 92)

(1813—1885),

93),

()

()

, V_m

()

(62.1)

$$p_k V^3 - (RT_k + p_k b)V^2 + aV - ab = 0 \quad (62.2)$$

(« »).

V_k ,

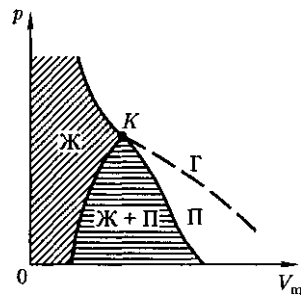
$$p_k(V - V_k)^3 = 0,$$

ИЛИ

$$p_k V^3 - 3p_k V_k V^2 + 3p_k V_k^2 V - p_k V_k^3 = 0. \quad (62.3)$$

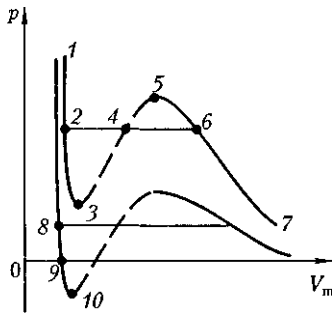
(62.2) (62.3)

низвест-



.93

Рис. 94



тенциальной

[(61.1)]:

$$p' = \frac{a}{V_m^2}$$

(
94),
2-6,

$$\delta A = p' dV_m = \delta \Pi, \text{ или } \delta \Pi = \frac{a}{V_m^2} dV_m,$$

5-6 2-3.

$$\Pi = -\frac{a}{V_m}$$

2-3

5-6 —

V_m ,

(§ 60).

(94).

$$U_m = C_V T - \frac{a}{V_m} \quad (63.1)$$

8-9

9-10 —

§ 63.

, ... $\delta Q = 0$)

(
-0),

$$= (U_2 - U_1) + \delta A, \quad [\delta Q = U_1 = U_2. \quad (63.2)$$

$C_V T$; § 53)

(63.2)

$$U_1 - U_2$$

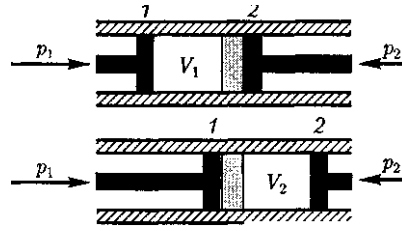
$$(T_1 = T_2), \dots$$

(63.2),

$$U_1 = C_V T_1 - \frac{a}{V_1}, U_2 = C_V T_2 - \frac{a}{V_2}, \quad (63.3)$$

$$T_1 - T_2 = \frac{a}{C_V} \left(\frac{1}{V_1} - \frac{1}{V_2} \right).$$

$$V_2 > V_1, \quad T_1 > T_2, \dots$$



.95

I находит-

V_1

$p_1,$
 $T_1,$

2

(

$p_2, V_2,$

$T_2.$ постоянными ($p_1 > p_2$).

(),

$$\delta Q = (U_2 - U_1) + \delta A = 0. \quad (64.1)$$

§64.

$$2 (A_2 - p_2 V_2)$$

$$(A_1 = p_1 V_1), \dots \delta A = A_2 - A_1.$$

(64. 1),

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2. \quad (64.2)$$

$$U + pV.$$

Дж.

(1818—

1889) У. Томсон (1824—1907).

$$(64.2)$$

.95

(63.3)

(61.2)

$p_1 V_1$ и $p_2 V_2$ (« »)

$$T_2 - T_1 = \frac{2a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right) - b(p_2 - p_1)}{C_V + R} - \frac{ab\left(\frac{1}{V_2^2} - \frac{1}{V_1^2}\right)}{C_V + R} \quad (64.3)$$

$$(64.3)$$

$$(T_2 - T_1)$$

$$(\Delta < 0),$$

$$(\Delta T > 0).$$

$p_2 \ll p_1$ и $V_2 \gg V_1$:

1) $a \approx 0$ —

$$T_2 - T_1 \approx \frac{-b(p_2 - p_1)}{C_V + R} > 0,$$

$$(64.4)$$

2) $a \approx 0$ —

$$T = \frac{2a}{Rb} \left(1 - \frac{b}{V}\right) \quad (64.5)$$

$$T_2 - T_1 \approx \frac{2a\left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right)}{C_V + R} < 0,$$

$$(64.5),$$

3)

$$(64.3)$$

$$(61.2)$$

p_1 ,

$$T_2 - T_1 \approx \frac{-\frac{2a}{V_1} + \frac{bRT_1}{V_1 - b}}{C_V + R} + \frac{\frac{ba}{V_1^2} - \frac{ab}{V_1^2}}{C_V + R} =$$

$$= \frac{bRT_1}{V_1 - b} - \frac{2a}{V_1}, \quad (64.4)$$

V_1

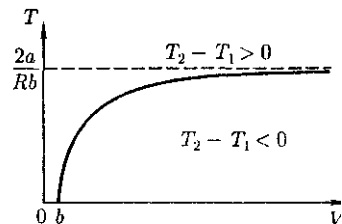
температуры T_1 .

0,1
17 °

35 °

20

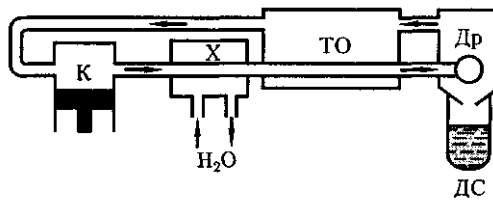
. 96



$$V_m = RT, \quad (64.2)$$

$$C_V T_1 + RT_1 = C_V T_2 + RT_2,$$

$$T_1 = T_2.$$



.97

§ 65.

(X)

(§ 62).

(Cl₂, CO₂, NH₃)

(O₂, N₂, H₂)

154,4, 126,1

33), 1908 .

Г. Камерлинг-Оннес (1853—1926)

6—8

(≈5%),

(5,3) .

(§ 49),

*Линде*¹—

. 97.

()

¹ (1842—1934) —

500—600

§ 66.

(1894 — 1952).

(§ 28).

образом,

(§ 60),

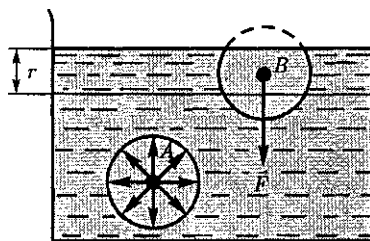
()

(§ 90);

10^{-9})

r ,

(. 98) r .



.98

r .

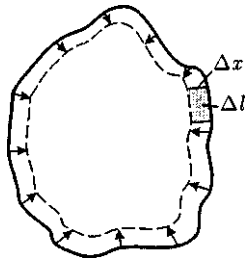
$AS:$

$$\Delta E = \sigma \Delta S, \quad (66.1)$$

F ,

ЖИДКОСТИ.

()



(. 99),

$$\Delta A = f \Delta l \Delta x,$$

/—

. 99 , $\Delta l \Delta x = \Delta S$, т.е.

$$\Delta A = f \Delta S. \quad (66.2)$$

$$\Delta A = \Delta E. \quad (66.3)$$

(66.3) видно, что

$$\sigma = f, \quad (66.4)$$

тонна
(66.1)].

(/)
(/ ²) [. (66.4)
жидкостей
300
²—10⁻¹ / .

— Нью-

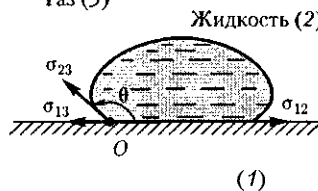
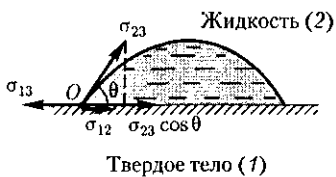
4,5 • 10⁻² /).

7,5 • 10⁻²

§67.

. 100,

(. 101).



$$\sigma_{13} > \sigma_{12}, \quad \cos \theta > 0 \quad 9 -$$

(. . . 100), . . .

$$\sigma_{13} < \sigma_{12}, \quad \cos \theta < 0 \quad 0 -$$

(. . . 101), . . .

(67.1),

$$\frac{|\sigma_{13} - \sigma_{12}|}{\sigma_{23}} \leq 1. \quad (67.2)$$

(67.2)
(2)

поверхностным

$\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$

0

$$\sigma_{13} > \sigma_{12} + \sigma_{23},$$

100)

$$\sigma_{12} > \sigma_{13} + \sigma_{23},$$

$$-\sigma_{13} + \sigma_{12} + \sigma_{23} \cos \theta = 0,$$

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}}. \quad (67.1)$$

(67.1)

$$\sigma_{13} > \sigma_{12}.$$

(. 102).

$$\Delta l$$

$$\Delta F = \sigma \Delta l,$$

$$(\Delta \vec{F}_1 \text{ и } \Delta \vec{F}_2), \begin{matrix} \Delta \vec{F} \\ \Delta \vec{F}_2 \end{matrix},$$

« »

$$\Delta F_1:$$

$$F = \sum \Delta F_1 = \sum \Delta F \sin \alpha = \sum \sigma \Delta l \frac{r}{R} = \frac{\sigma r}{R} \sum \Delta l = \frac{\sigma r}{R} 2\pi r.$$

§ 68.

$$\pi r^2,$$

()

$$S = \frac{2\sigma}{R}. \quad (68.1)$$

R,

$$= \dots \quad (68.2)$$

$$r = R \sin \alpha$$

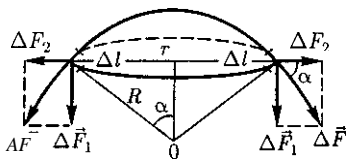


Рис. 102

$$(68.1) \quad (68.2)$$

Лапласа¹,

(1749—1827) —

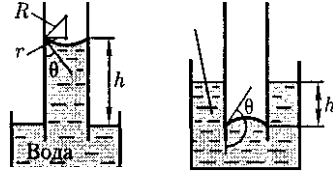
ныи.

произвольной

жидко-

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (68.3)$$

R_1 и R_2 —



ПЛОСКОЙ

(68.3) $(R_1 = R_2 = R)$ (68.1),
 $(R_1 = R \text{ и } R_2 = \infty)$ —

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\infty} \right) = \frac{\sigma}{R}$$

$= R_2 = \infty)$

$(R_1 =$

§ 69.

$$\frac{2\sigma \cos \theta}{r} = \rho gh,$$

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho gr}. \quad (69.1)$$

, а (69.1) $0 < -(\cos \theta > 0)$

$\theta > \frac{\pi}{2}$ ($\cos \theta < 0$) — (69.1)

(68.2).

$(\theta = 0)$

$$\left(\rho = 1000 \text{ кг/м}^3, \mu = 0,073 \text{ Па}\cdot\text{с} \right)$$

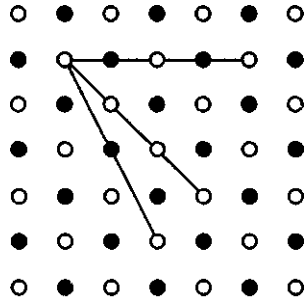
$$h \approx 3 \text{ м.}$$

М. В. Ломоносо-

§ 70.

(1879—1960),

(. . . 104),



(1811 1863).

3

§71.

; 2) : 1) (, и).

1.

точки.

(1853 1919),

230

230

Кристаллографическая система	Характеристика элементарной ячейки	Форма элементарной ячейки
Триклинная	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	
Моноклинная	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Ромбическая	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Тетрагональная	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
Ромбоэдрическая (тригональная)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
Гексагональная	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ,$ $\gamma = 120^\circ$	
Кубическая	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	

NaCl (

Na⁺,
Cl⁻) CsCl (

. 105.

(3 γ a, b,
a, b c , (3 γ (. 3).
и

2.

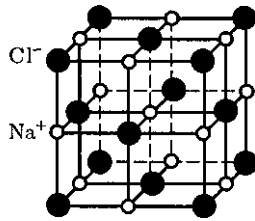
CsCl, KBr . .),

(NaCl, (MgO, CaO . .).

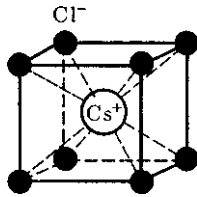
Ge

Si.

. 106,

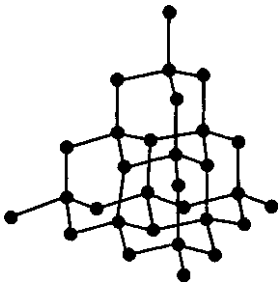


NaCl



CsCl

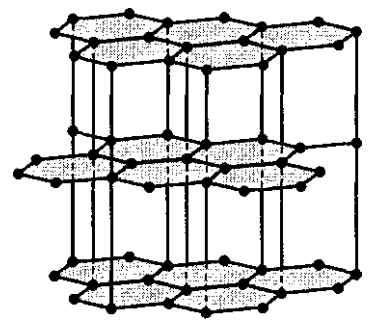
. 105



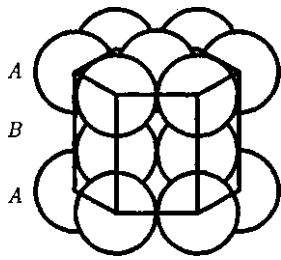
(
 Kr, Xe), CO₂, O₂, N₂
 Br₂ I₂.
 (Ne, Ar,

меополярной
 « »
 (. 107)

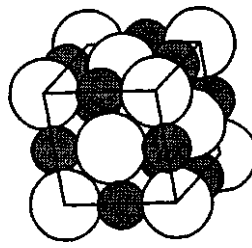
(Li, Na, , Rb,
 Cs)
 (Cu, Ag, Pt,)



.110



.112



: 1)

(= 181)

... —

(. 110); 2)
ABCABC...—

(. 111).

1 ,

Na

Na.

($r = 98$).

1 —

12

—

74 %

§72.

(. 106)

8,

4.

§ 71

периодом

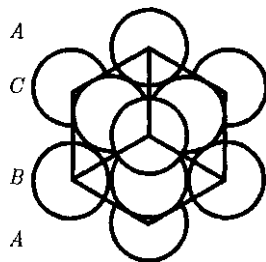
ABCBCACBCBAC...

SiC
6, 15 243

(, , ,),

. 112

.111

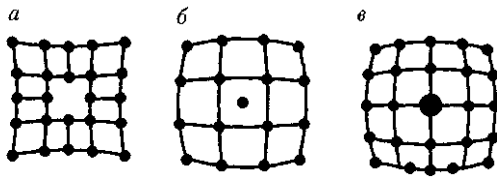


: 1)

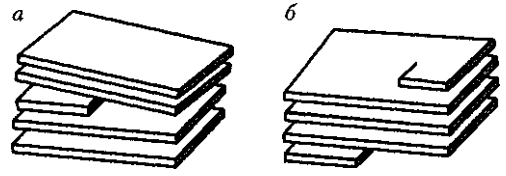
(. 113,); 2)

); 3)

(. 113,



.113



.114

(, .113,),
 113,6;
 (, .
).
 , —
 (,)
 « »

§73.

(.114,).
 (.114,6)
 (, ,),
 — —
 (, ,)
 (.§ 50),

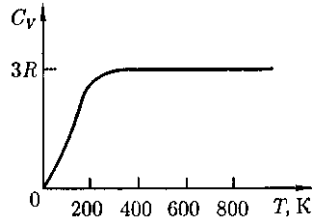
$10^2-10^3 \text{ cm}^{-2}$,
 $10^{10}-10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

1

$$U_m = 3N_A kT = 3RT,$$

$(R = \frac{N_A k}{\text{моль}}; N_A k = R)$

$$C_V = \frac{dU_m}{dT} = 3R = 25 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}), \quad (73.1)$$



.115

... () (. 4),

$$(3R)$$

(, Be,)

(1785 — 1838)

(1791 — 1820)

(. § 53),

(, NaCl),

1

(. 115).

nN_A —
(NaCl

T^3 ,

1 NaCl 1) $2N_A$, Na N_A

(73.1).

3R 1800 !

$$C_V = 3nR \approx 25n \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}),$$

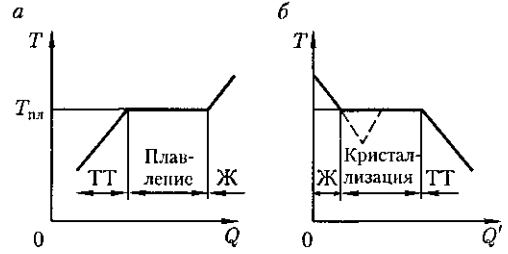
4

Вещество	C_V , Дж/(моль · К)	
	Теоретическое значение	Экспериментальное значение
Алюминий Al	25	25,5
Алмаз C	25	5,9
Бериллий Be	25	15,6
Бор B	25	13,5
Железо Fe	25	26,8
Серебро Ag	25	25,6
NaCl	50	50,6
AgCl	50	50,9
CaCl ₂	75	76,2

§ 74.

перейти

(
) ,
(
).



.116

(§ 62).

$T_{пл}$
 $T_{пл}$
 $T_{пл}$
СОСТОЯНИЕ,

$T_{пл} — const$

1

(. 116, б; Q' —

):

$T_{пл}$

116,

$T(Q), Q —$

. 116,
)

§75.

I II

... — , — , , ... , , . « » (,), « ».

II . (, , —).

(1908—1968). II :

(, и) ;

I () 0 , ;

I (**I**) = 2,9 (**II**),

§ 76.

... ПОНЯ-

§ 60,

() ,

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}, \quad (76.1)$$

$L -$; $-$

$(V_2 - V_1) -$

(. 117),

L $(V_2 - V_1)$.

(), ()
(),

(76.1),

$$\frac{dp}{dT} > 0;$$

(), ()
() .

$$\frac{dp}{dT} > 0;$$

(

. 117).

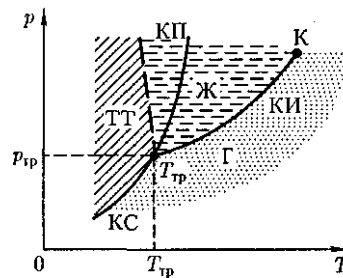
(₂, Ge,) .

p_{TP})

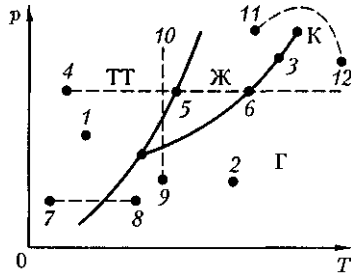
.117

(0,01 °)

273,16



.118



$\dots \frac{dp}{dT} < 0;$

.117).

3 ~ 2 —

4—5—6.

5,

-
-
-
-
-

?

7, (7—8)
 9, (9—10)
 : — —
 (. .117

118) ,

(11—12 . 118), . .

()

()

не

, = 0 = .

?
 1 ;
 ?
 ?
 метастабильными

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

, — ? ? ? ? ?
 ?
 ? ?
 ? ? ?
 ? ? ?
 ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?
 ? ? ? ? ?

- 10.1. $m - 1$; 2) 290 ; $0,365 \cdot M^4 / \text{МОЛЬ}^2$
- 20 . ; 1) ; 2) 2,76]
 $4,3 \cdot 10^{-5} M^3 / \text{МОЛЬ}$. [1] 2,44 ; 2) 2,76]
 10.2. $v = 2$; $V_1 = 1 \text{ л}$.
- $V_2 - 10 \Delta$; $0,136 \cdot M^4 / \text{МОЛЬ}^2$. [-11,8]
- 10.3. , — ,
- 10.4. , ,
- $d_1 = 2$; $d_2 = 6$.
 $40 / [0,8]$
 $h = 20$
- 10.5. $d - 0,02$
 $= 73 / , =$
- = $1 / ^3$. [118]
 10.6. $d - 3$
- $= 0,5 / [2] / = 3,7 .$ $= 13,6 / ^3,$
- 10.7. 25 10 30 °C
 117 Дж
 $[M \approx 0,107 / ;]$

§ 77.

, . . .
 (XVI) : (),
 (. § 92)
 , . . .
 (,)
 , ()—
 :
 , ;
 , ()
 , ()
 , — 1843 .
 (1910—1914) . (1791—1867), —
 (1868— :
 1953) , (,)
 , . . .
 (—
 — $1,6 \cdot 10^{-19}$) . (m_e —
 = $9,11 \cdot 10^{-31}$)) (m_p = —
 = $1,67 \cdot 10^{-27}$)) , . . .

ИЛИ ПОКОИТСЯ.

(

100).

рода (: 1) —

; 2)

F

Q₁ Q₂

$$F = k \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2},$$

. Указанное

F

(F < 0)

(F > 0)

$$\vec{F}_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r},$$

F₁₂ —

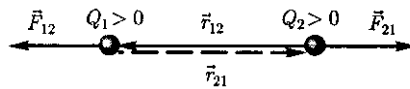
Q₁

Q₂; r₁₂ —

Q₁, r = |r₁₂| (. 119).

Q₂

§ 78.



1785 . . .

.119

$$\vec{F}_{21} = -F_{12}$$

Q_1

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

CPI

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

ϵ_0

;

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \text{ или}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \quad (78.3)$$

[() —
(§ 93)].

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$$

10^7

10^{-17}

(

F,

Q_0

)

(78.2),
 Q_0

\vec{F}
 Q_0

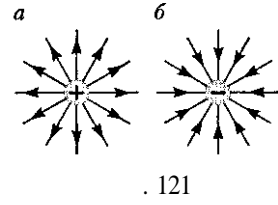
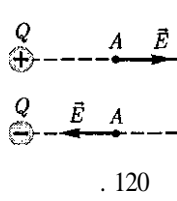
Q_0

§ 79.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0} \quad (79.1)$$

(78.1), (79.1)

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \text{ или } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}. \quad (79.2)$$



()

(. 120).
(79.1)

(. 122):

1 / — (/):
1 / — 1 ; 1 / = 1 / ,
() — (. § 84).

$$n \text{ к } E dS \cos \alpha = E_n dS,$$

$$\frac{E_n}{\text{к}} dS \text{ (рис. 123).}$$

(. 121).

\vec{E}

$$dS = dS n \text{ — } dS.$$

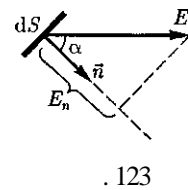
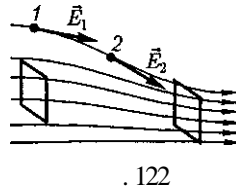
к () , dS)

()

(•).

(. 121,),

(. 121,).



S

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \oint_S \vec{E} d\vec{S}, \quad (79.3)$$

S .

:

n .

,

.

:

,

,

,

.

,

.

§ 80.

Q_1, Q_2, \dots, Q_n .

$(+Q - Q)$,

l

$Q_0,$ $F,$
 $F_i,$

$Q_i:$

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (80.1)$$

(79.1), $F = Q_0 E,$

$E_i -$

$Q_i,$
(80.1),

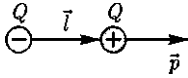
$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (80.2)$$

(80.2)

()

($\leq 10^{-15}$).

. 124



(,)

$$\vec{p} = |Q|\vec{l}, \quad (80.3)$$

$|Q|$

нълм

(. 124).
принципу суперпозиции
 \vec{E} поля

(80.2),

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-,$$

E_+ и E_-

$$E_A = E_+ -$$

$$(79.2) \quad r,$$

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{Q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{Q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] =$$

$$= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 + \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2 \left(r + \frac{l}{2}\right)^2}.$$

$$\frac{l}{2} \ll r,$$

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ql}{r^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2p}{r^3}.$$

2.

[. 125, ()].

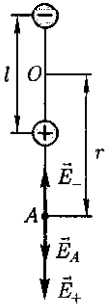
1.

A (. 125,).

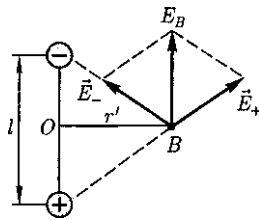
$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{(r')^2 + \frac{l^2}{4}} \approx$$

$$\approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{(r')^2}, \quad (80.4)$$

a



b



. 125

r'

E_B ,

$$\frac{E_B}{E_+} = \frac{l}{\sqrt{\left(r'\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \approx \frac{l}{r'},$$

$$E_B = \frac{E_+ l}{r'} \quad (80.5)$$

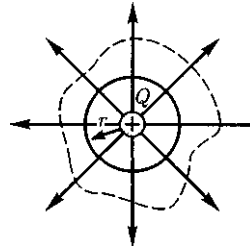
$$(80.4), \quad (80.5)$$

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ql}{(r')^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{(r')^3}$$

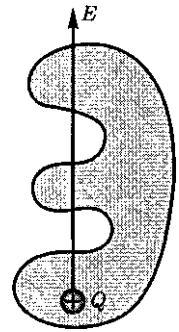
$$\vec{E}_B \quad , \quad (\quad p$$

).

§ 81.



. 126



. 127

127),

1855)

(1777 —

(79.3)

(. 126),

$$\Phi_E = \oint_S E_n dS = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (81.1)$$

126)

(80.2)

§ 82.

E_i

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i.$$

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S \left(\sum_i \vec{E}_i \right) d\vec{S} = \sum_i \oint_S \vec{E}_i d\vec{S}.$$

(81.1),

1. (. 128)

$$+\sigma \left(\sigma = \frac{dQ}{dS} \right)$$

$\frac{Q_i}{\epsilon_0}$

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (81.2)$$

(81.2)

($\cos \alpha = 0$),

ϵ_0 .

$2ES$.

(E_n)

, . .

σS .

(81.2),

$$2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon_0},$$

M. (1801 1862),

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

(82.1)

« »

$$= \frac{dQ}{dV},$$

(82.1)

2.

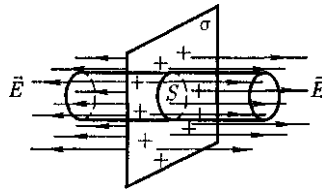
(. 129).

S,

$$\int_V \rho dV.$$

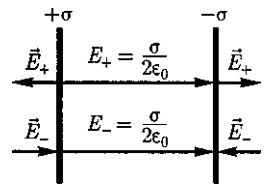
(81.2)

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV.$$



. 128

. 129



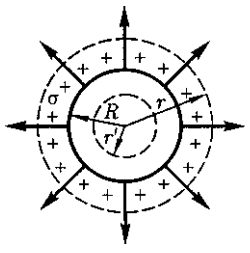
номерно

+σ -σ.

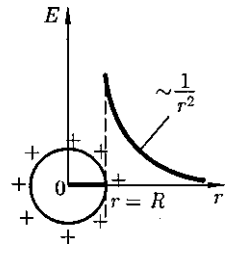
[E₊ -

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (82.2)$$

3.



. 130



. 131

$r > R,$
 Q

$$(81.2), \quad 4\pi r^2 E = \dots$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (r \geq R). \quad (82.3)$$

$r > R$

r

. 131.

$r' < R,$

E от r

(- 0).

4.

R

Q

номерно с **объемной плотностью** ρ ($\rho = \frac{dQ}{dV}$)

. 3),

вне

[. (82.3)].

$r' < R.$
ме Гаусса (81.2), $4\pi(r')^2 E = \frac{Q'}{\epsilon_0} = 4/3 \frac{\pi(r')^3 \rho}{\epsilon_0}.$
Учитывая, что $\rho = \frac{Q}{4/3 \pi R^3}$, получаем

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^3} r' \quad (r' \leq R). \quad (82.4)$$

(82.3),

(82.4).

r'

E от r

. 132.

5.

(. 133)

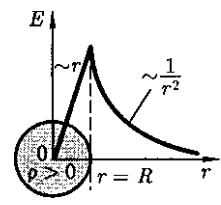
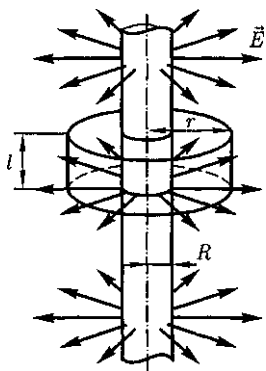


Рис. 132



$$\left(\frac{dQ}{dl} \right)$$

r l (. . . 133).

$$(81.2), \quad r > R \quad 2\pi r l E = \frac{\tau l}{\epsilon_0},$$

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\tau}{r} \quad (r \geq R). \quad (82.5)$$

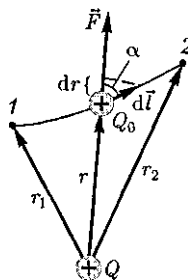
$r < R,$

$= 0.$

(82.5),

§ 83.

Q l 2



134)

$Q_0,$

dl

$$dA = \vec{F} d\vec{l} = F dl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r^2} dl \cos \alpha.$$

Так как $dl \cos \alpha = dr,$ то

$$dA = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r^2} dr.$$

$$A_{12} = \int_1^2 dA = \frac{QQ_0}{4\pi\epsilon_0} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{QQ_0}{r_1} - \frac{QQ_0}{r_2} \right) \quad (83.1)$$

(. § 12).
(83.1)

$L,$

(83.2)

(§ 12).

[(12.2)].

$$= E \cos \alpha - dl \quad E dl - E_l dl, \quad E_l =$$

(83.1)

(83.2)

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_l dl = 0. \quad (83.3)$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_l dl$$

поля

(83.3),

()

(83.3)

(83.3)

).

§ 84.

()

Q_0 ,
 Q :

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r_2} = U_1 - U_2, \quad (84.1)$$

Q_0 , Q

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r} + C.$$

Уопределя-

($r \rightarrow$)

($U = 0$),

$= 0$
 Q_0 ,

r ,

Q

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_0 Q}{r}. \quad (84.2)$$

$Q_0 Q > 0$

()

()

$Q_0 Q < 0$

()

Q_1, Q_2, \dots, Q_n ,

Q_0 ,

Узаряда Q_0 ,

U_i

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = Q_0 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i} \quad (84.3)$$

(84.2) (84.3)

$\overline{Q_0}$

Q_0

$$\varphi = \frac{U}{Q_0} \quad (84.4)$$

φ

(84.4) (84.2)

Q

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_n} \frac{Q}{r} \quad (84.5)$$

Q_0 1 2 [(84.1), (84.4), (84.5)],

$$A_{12} = U_1 - U_2 = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (84.6)$$

..

2

1

(84.4) (84.6)

1 2.

1

1 (1 = 1 /)

ПОЛЯ.

§ 79

Q_0

1

2

$$= 1 \text{ Н} \cdot / (\cdot) = 1 \text{ Дж} / (\text{Кл} \cdot) = 1 / .$$

$$A_{12} = \int_1^2 Q_0 \vec{E} d\vec{l} \quad (84.7)$$

(84.6) (84.7),

:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = \int_1^2 E_l dl, \quad (84.8)$$

Q_0

, ...

(84.6),

$$A_{\infty} = Q_0 \varphi,$$

$$\varphi = \frac{A_{\infty}}{Q_0} \quad (84.9)$$

—

(84.3) (84.4)

«↔»

«↔»

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i}$$

(§ 25),

§85.

φ

(84.5),

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

$$x_1 - x_2 = dx, \quad E_x dx$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -d\varphi$$

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad (85.1)$$

z,

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right),$$

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ —

x, y, z .

(12.4)

(12.6)

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi, \text{ или } \vec{E} = -\nabla\varphi, \quad (85.2)$$

Сравниваемые характеристики	Виды полей	
	Гравитационное	Электростатическое
Сила	$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$
Напряженность	$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}$
Работа по перемещению тела или заряда	$A = m \left(\frac{GM}{R_2} - \frac{GM}{R_1} \right) = m(\varphi_1 - \varphi_2)$	$A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{QQ_0}{r_1} - \frac{QQ_0}{r_2} \right) = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$
Работа по замкнутому контуру	$\oint_L dA = 0$	$\oint_L dA = 0$
Потенциал	$\varphi = \frac{\Pi}{m}$	$\varphi = \frac{U}{Q_0}$
Связь между напряженностью и потенциалом	$\vec{g} = -\text{grad} \varphi$	$\vec{E} = -\text{grad} \varphi$

()

()

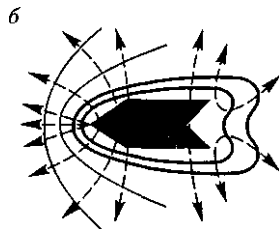
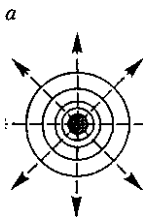
(. 135,)

(. 135,).

. 5

. 135

§ 86.



§ 85

. 135

ЭТОГО ПОЛЯ.

1.

$$(82.1): \quad = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}, \quad \sigma -$$

x_1 и x_2 (85.1) [

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma}{2\epsilon_0} dx = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (x_2 - x_1).$$

2.

$$(82.2): \quad = \frac{\sigma}{\epsilon_0},$$

—

d [

(85.1)],

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_0^d E dx = \int_0^d \frac{\sigma}{\epsilon_0} dx = \frac{\sigma}{\epsilon_0} d. \quad (86.1)$$

3.

R

по (82.3): $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$. Разность потенциа-

$r_1 > R, r_2 > r_1$, r_1, r_2 ($r_1 > R$).

$$\begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} dr = \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \end{aligned} \quad (86.2)$$

$r_1 = r$ и $r_2 =$,

ПОЛЯ

(86.2),

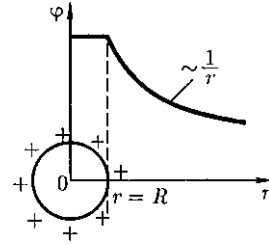
$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

[

(84.5)].

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R}$$

. 136.



4.

R Q
($r > R$) вычисляется формуле (82.3),

$$(r_1 > R, r_2 > R, r_2 > r_1), \quad (86.2).$$

$$(r' < R), \quad (82.4): \quad = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^3} r'.$$

Следовательно,

r'_1 и r'_2 , на ($r'_1 < R, r_1 < R, r'_2 > r'_1$),

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r'_1}^{r'_2} E dr = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 R^3} [(r'_2)^2 - (r'_1)^2].$$

5.

$$(r > R) \quad (82.5): \quad E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\tau}{r}.$$

r_1 и r_2
($r_1 > R, r_2 > r_1$),

$$\begin{aligned} \varphi_1 - \varphi_2 &= \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \\ &= \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_1}. \end{aligned} \quad (86.3)$$

§87.

()

$+ Q$ « » 1, r,...) (NaCl,
 $- Q$
 « »

(80.3).
 (N₂,
 H₂, O₂, CO₂, CH₄, ...)

« »
 p

()

(2 ,
 NH₃, SO₂, CO, ...) « »

свойства ; $\epsilon - > 0$
 $\approx 25, \epsilon = 80$.

()

\vec{E}_0

. 137.

§ 88.

$+\sigma'$

нескомпенсированные

p_i

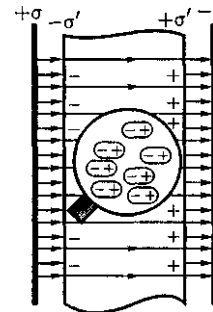
$$\vec{p}_V = \sum_i \vec{p}_i,$$

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{V}. \quad (88.1)$$

(§ 91)

$$\vec{P} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad (88.2)$$

$\epsilon -$



. 137

$$\text{внешним} \\ - E_0. \quad \epsilon = 1 + \alpha \quad (88.6)$$

$$(88.6), \quad \epsilon \quad (88.5)$$

$$E_0 (\quad) ,$$

§ 89.

$$E = E_0 - E'$$

$$E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0} [\quad ,$$

$$; \quad (82.2)],$$

$$E = E_0 - \frac{\sigma'}{\epsilon_0}. \quad (88.3)$$

$$(88.5),$$

$$\sigma'. \quad (88.1)$$

$$p_V = PV = PSd, \quad S -$$

$$, d -$$

$$(80.3),$$

$$PSd = \sigma' S d$$

$$\sigma' = P, \quad (88.4)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}. \quad (89.1)$$

$$\sigma \quad (88.6) \quad (88.2),$$

СТИ .

$$(88.3) \quad (88.4)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (89.2)$$

$$(88.2),$$

$$= E_0 - \alpha E,$$

$$(\quad / \quad ^2).$$

$$E = \frac{E_0}{1 + \alpha} = \frac{E_0}{\epsilon}. \quad (88.5)$$

D

$$D_n = \epsilon_0 E_n (\epsilon = 1),$$

[(81.2)]

\vec{D} характеризует

$$\oint_S \epsilon_0 E_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

(. . .),

\vec{E}, D

(81.2)

(§ 79).

\vec{E}

$$\oint_S \epsilon_0 \vec{E} dS = \oint_S \epsilon_0 E_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i + \sum_{i=1}^k Q_{i\text{cb}},$$

$$- \sum_{i=1}^n Q_i \text{ и } \sum_{i=1}^k Q_{i\text{cb}} -$$

D —

S .

D

S поток D

$$\Phi_D = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \oint_S D_n dS,$$

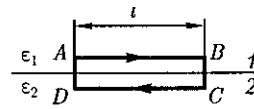
$$D_n \text{ — } \int_S dS \text{ } D$$

§ 90.

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i, \quad (89.3)$$

и D

$\epsilon_1 \epsilon_2$)

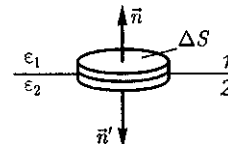


. 138

l и 2

ABCD, l,

$$(83.3)$$



. 139

$$\oint_{ABCD} \vec{E} d\vec{l} = 0,$$

$$E_{\tau 1} l - E_{\tau 2} l = 0$$

AB и CD

(

и DA

$$E_{\tau 1} = E_{\tau 2}. \quad (90.1)$$

$$(89.1),$$

$\epsilon_0 \epsilon$,

$$\frac{D_{\tau 1}}{D_{\tau 2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}. \quad (90.2)$$

(рис. 139)

нования ΔS настолько

$$D \quad (89.3),$$

$$D_{n1} \Delta S - D_{n2} \Delta S = 0$$

'к

$$D_{n1} = D_{n2}. \quad (90.3)$$

$$(89.1),$$

D

$\epsilon_0 \epsilon$,

$$\vec{E}(E_{\tau}) \text{ и } D(D_n)$$

$$\vec{E}(E_n) \text{ и } D(D_{\tau})$$

$$(90.1) - (90.4)$$

$$\alpha_1 \alpha_2$$

$$(90.1) \quad (90.4), \quad E_{\tau 2} =$$

$$\epsilon_2 > \epsilon_1). \quad E_{\tau 1} \epsilon_2 E_{n2} = \epsilon_1 E_{n1}.$$

\vec{E}_1 и \vec{E}_2 у

генциальные

. 140

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{E_{\tau 2} / E_{n2}}{E_{\tau 1} / E_{n1}}.$$

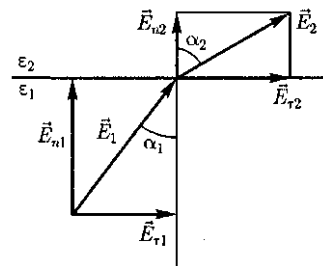


Рис. 140

D) (,

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}.$$

, , сегнетовой , $\varepsilon_{\max} \approx 10^4$).

E и D уда-

§ 91.

Сегнетоэлектрики

, [(1859—1906)].
) , ... ;
 (—18 +24 °)

(1903 —
 1960) . . . (1897—1954)
NaKC4H4O6 · 4H2O (

) BaTiO3.

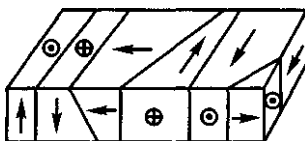
сегнетоэлектрик П (. § 75).

— ε
 (, ε)

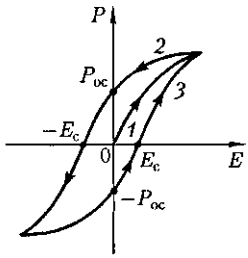
(. 141), \odot, \oplus ука-

(88.2) ;
 поляризованности ()
 ()

Рис. 141



(«
 . 142,
 »).



фект).

(I).

$$2, \quad = 0$$

P_{0c} . . .

().

$(-E_c)$.

(E_c . coercitio—

).

3

§92.

(1903—1985)

высокой

()

применение (например,

).

. Сегнето-

ε (

).

Следует

~

$$\vec{E} = 0.$$

(85.2),

$(\varphi = \text{const}), \dots$

\vec{E} (. 143).

(. § 85).

равен

\vec{E}_1 (, D_1)

D

(89.3),

заряды

(DAS)

$(Q = \sigma \Delta S),$

$: DAS = \sigma \Delta S, \dots$

$D = \sigma$ (92.1)

Q нескомпенсированные или

$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0 \epsilon},$ (92.2)

(89.3),

Q

$Q = \oint_s \vec{D} d\vec{S} = \oint_s D_n dS = 0,$

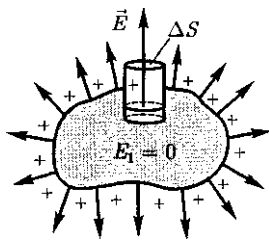
(92.2)

$D = 0.$

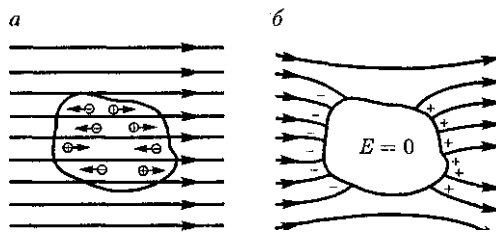
$AS,$

(. 144, a).

. 143



(. 144,).



. 144

. 144, б

(92.1),
D

(1901 — 1967),

D (. 145),
2.

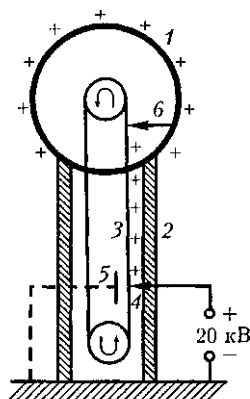
1

3

4,

5

. 145



169

$$1 \quad (84.5),$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\epsilon R}. \quad (93.1),$$

§ 93.

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R. \quad (93.2)$$

(84.5),

$$R - \frac{C}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^6, \quad C \approx 0,7$$

$$Q = C\varphi.$$

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad (93.1)$$

(), (), (), (), (/) [. (78.3)]. ϵ_0 —

§ 94.

(. § 93).

(): 1 —

), () ,
 , Q ,
 , Q , (86.1) (94.1).

[(93.1)]
 (86.1),

(), $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma d}{\epsilon_0 \epsilon}$, (94.2)

ϵ —
 , (94.1),
 $Q = \sigma S$, (94.2),

1) (§ 82):
 ; 2) $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$. (94.3)
 ; 3)

и $r_2 (r_2 > r_1)$, r_1

напряженности

(86.3)

$= \frac{Q}{l}$ —

Q ,
 ($\varphi_1 - \varphi_2$)

$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1}$. (94.4)

$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2}$. (94.1)

(94.4) (94.1),

$-\varphi_1 \frac{Q}{\varphi_2}$

$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$. (94.5)

S ,
 d ,
 $+Q -Q$

(86.2)

и $r_2 > r_1$

r_1

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (94.6)$$

(94.6) (94.1),

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \quad (94.7)$$

Если $d = r_2 - r_1 \ll r_1$, то $r_2 \approx r_1 \approx r$ и $C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}{d}$. Так как $4\pi r^2$ — площадь сферической поверхности,

(94.3).

(94.5) In

(94.3).

(94.3), (94.5) (94.7)

1.

(. 146).

$\varphi_A - \varphi_B = C_1, C_2,$

..., C_n , (94.1),

$$Q_1 = C_1(\varphi_A - \varphi_B),$$

$$Q_2 = C_2(\varphi_A - \varphi_B),$$

$$\dots$$

$$Q_n = C_n(\varphi_A - \varphi_B),$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = (C_1 + C_2 + \dots + C_n)(\varphi_A - \varphi_B).$$

$$C = \frac{Q}{\varphi_A - \varphi_B} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i,$$

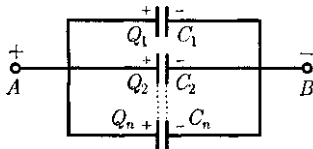
2.

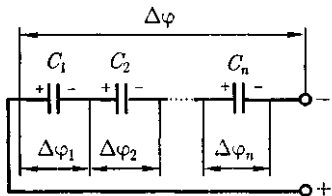
(. 147).

$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^n \Delta\varphi_i,$$

$$\Delta\varphi_i = \frac{Q}{C_i}.$$

146





$$\Delta\varphi = \frac{Q}{C} = Q \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i},$$

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i},$$

§ 95.

1.

(§ 83);

$Q_1, Q_2,$

[(84.2) (84.5)]:

$$W_1 = Q_1\varphi_{12}, \quad W_2 = Q_2\varphi_{21},$$

$\varphi_{12}, \varphi_{21}$

$Q_1, Q_2, Q_1, Q_2.$

(84.5),

$$\varphi_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_2}{r} \quad \text{и} \quad \varphi_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r},$$

поэтому $W_1 = W_2 = W$ и

$$W_1 = Q_1\varphi_{12} = Q_2\varphi_{21} = \frac{1}{2} (Q_1\varphi_{12} + Q_2\varphi_{21}).$$

$Q_3, Q_4, \dots,$

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i\varphi_i, \quad (95.1)$$

φ_i — создаваемые той Q_i , i -го.

2.

Q, dQ, dQ

$$dA = \varphi dQ = C\varphi d\varphi.$$

$$A = \int_0^\varphi C\varphi d\varphi = \frac{C\varphi^2}{2}. \quad (95.2)$$

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C}. \quad (95.3)$$

(95.3)

$$F = -\frac{dW}{dx} = -\frac{Q^2}{2\epsilon_0\epsilon S}$$

« \leftrightarrow » , F

(95.1)

4.

(95.4),

$$W = \frac{1}{2}\varphi \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{Q\varphi}{2}$$

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$(C = \frac{\epsilon_0\epsilon S}{d})$$

$$(\Delta\varphi = Ed)$$

3.

(95.3)

$$W = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} Sd = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} V, \quad (95.7)$$

$$V = Sd \quad (95.7)$$

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{Q\Delta\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C}, \quad (95)$$

$$Q \text{ — ; } \Delta\varphi \text{ — ; —}$$

(95.4),

торцию)

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2} \quad (95.8)$$

(95.8)

6 .

6 — Fdx за

$$: Fdx = -dW,$$

$$(88.2): \vec{P} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$$

$$(95.4) \quad (95.7)$$

$$F = -\frac{dW}{dx} \quad (95.5)$$

(95.4)

(94.3),

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2}{2\epsilon_0\epsilon S} x. \quad (95.6)$$

[(95.5)

(95.6)],

- 11.1. $0,8 / \dots$?
- $\epsilon = 2 \cdot [1,6 / \dots]$
- 11.2. $= 1,5 / \dots$
 $= 45^\circ$
 $r = 10 \cdot [1,88 \cdot \dots]$
- 11.3. $= 10 / \dots$
 $= 20 \cdot [1 / \dots]$
- 11.4. $R = 10$
 $r_1 = 2$
 $r_2 = 12$
 $E(r) \cdot [1] 3,77 / \dots$
 ; 1)
 ; 2)
- 2) 13,1 /]
- 11.5. $= 1 \text{ нКл/см.}$
- $r_1 = 2,5$ $r_2 = 1,5$? [18 /]
- 11.6. $R = 4$
 $= 1 / \dots$
 $r_1 = 6$ $r_2 = 10 \cdot [1,2 \dots]$
- 11.7. $Q = 1$
 $0,1 \cdot [8 / \dots]$
 $r_1 = 10$ $r_2 = 5$
- 11.8. $d = 8,85$
 ($\epsilon = 2$).
- 11.9. $0,05 / \dots^2? [500 \dots]$
 $= 10 / \dots^3$
 $R = 5$
 $\epsilon = 6$
 $r_1 = 2$ $r_2 = 10$
 $[E_1 = 1,25 / \dots; E_2 = 23,5 / \dots]$
- 11.10. $d = 5$
 ($\epsilon = 7$), $U = 500$
 $C = 10$ $S = 50 \dots^2 [6,64 \dots]$
- 11.11. $U = 1$
 ; 1)
 ; 2)
- 11.12. $S = 100 \dots^2$
 $d = 1$
 $U = 200$
 ($\epsilon = 2$).
- [3,54]

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 96.

148,),

\vec{E}

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$I = \frac{Q}{t},$$

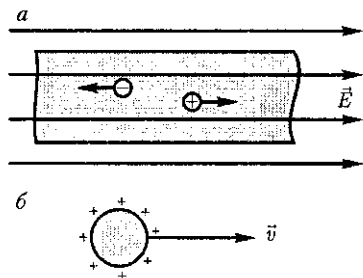
$Q -$

() [. . .].

$$j = \frac{dI}{dS_1}$$

$\langle v \rangle$

Рис. 148



$$dQ = ne(v)S dt.$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = ne\langle v \rangle S,$$

$$\vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle;$$

$$\vec{j} = ne\langle \vec{v} \rangle. \quad (96.1)$$

вектора \vec{j} ,

$$I = \int_S \vec{j} d\vec{S}, \quad (96.2)$$

$$dS = \vec{n} dS (\vec{n} \text{ — вектор нормали к элементу } dS).$$

ТОК.

§ 97.

$$\mathcal{E} = \frac{A}{Q_0}. \quad (97.1)$$

[(84.9) (97.1)].

$Q_0,$
 $E_{cr} —$

$$\vec{F}_{cr} = \vec{E}_{cr} Q_0,$$

Q_0

$$A = \oint \vec{F}_{cr} d\vec{l} = Q_0 \oint \vec{E}_{cr} d\vec{l}. \quad (97.2)$$

(97.2) $Q_0,$
 $\exists DC,$

$$\mathcal{E} = \oint \vec{E}_{cr} d\vec{l},$$

$1-2,$

$$\mathcal{E}_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{cr} d\vec{l}. \quad (97.3)$$

Q_0

$$F_c = Q_0 E.$$

$Q_0,$

$$\vec{F} = \vec{F}_{cr} + \vec{F}_c = Q_0 (\vec{E}_{cr} + \vec{E}).$$

$1-2,$

$$A_{12} = Q_0 \int_1^2 \vec{E}_{cr} d\vec{l} + Q_0 \int_1^2 \vec{E} d\vec{l}.$$

(97.3)

(84.8),

$$A_{12} = Q_0 \mathcal{E}_{12} + Q_0 (\varphi_1 - \varphi_2). \quad (97.4)$$

(§ 83),

$$A_{12} = Q_0 \mathcal{E}_{12}.$$

U

$1-2$

(97.4),

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}.$$

§ 98.

(1787—1854)

$I,$

(. . .

U),

$$I = \frac{U}{R}, \quad (98.1)$$

$R —$

(98.1)

):

(98.1)

():

ника,
ПОСТОЯННЫЙ ТОК 1 .

1

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$G = \frac{1}{R}$$

$$U = I R \quad (98.1)$$

$$I = \frac{U}{R} \quad (98.2)$$

$$\frac{I}{S} = j \quad (98.3)$$

$$j = \gamma E \quad (98.4)$$

$$\frac{R}{l}$$

$$S: \quad (98.4)$$

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (98.2)$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (98.5)$$

$$(1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}) \quad (1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м})$$

$$(2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}),$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad R = R_0(1 + \alpha t),$$

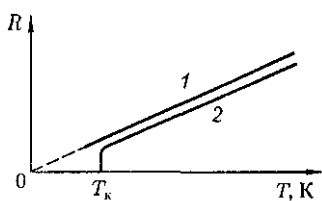
$$t \text{ } ^\circ\text{C}; \alpha -$$

$$(98.1), \quad (98.2)$$

$$1/273 \text{ K}^{-1}.$$

$$\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}, \quad (98.3)$$

$$R = \alpha R_0 T, \quad (98.6)$$



§ 99.

(98.6) . 149
(1).

, Al, Pb, Zn .)

(0,14 — 20),

(2), . . .

1911 . . .

.)

140 .

0,001 .

$$U \cdot dt = dq - Idt$$

[(84.6)]

$$dA = Udq = IUdt. \quad (99.1)$$

R,

(98.1),

$$dA = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt. \quad (99.2)$$

(99.1) (99.2) ,

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (99.3)$$

(.), (.); 1 . —

$$\frac{1}{1} ; 1 \cdot = 3600 \cdot = 3,6 \cdot 10^3 ;$$

$$\frac{1}{1} \cdot = 10^3 \cdot = 3,6 \cdot 10^0 .$$

$$dQ = dA. \quad (99.4)$$

(99.4), (99.1) (99.2),

$$dQ = IU dt = PR dt = \frac{I^2}{R} dt. \quad (99.5) \quad (1761 - 1834),$$

(99.5)
— **Ленца**,

§ 100.

цем¹.

. X.

$$dV = dS dl \quad (98.1) \quad [\dots]$$

(), $R = (\dots)$, ЭД

$$- \rho \frac{dS}{dt} \quad - \text{Ленца} \quad I-2 \quad \mathcal{E}_{12},$$

$$dQ = PR dt = \rho j^2 dV dt. \quad \varphi_1 - \varphi_2.$$

$$A_{12} \quad (I-2, \dots)$$

$$w = \rho j^2. \quad (99.6)$$

$$(j - \gamma E) \quad Q_0 \quad I-2, \quad (97.4),$$

$$\frac{1}{\dots}, \quad w = jE = \gamma E^2. \quad (99.7) \quad \mathcal{E}_{12}, \quad /, -$$

$$(99.6) \quad (99.7)$$

— **Ленца**

$$\mathcal{E}_{12} > 0. \quad \text{ЭДС} \quad (I-2),$$

1873 . (1847 —

$$\mathcal{E}_{12} < 0.$$

1923)

$$[\dots (99.5)]$$

$$Q = I^2 R t = IR(I t) = IR Q_0. \quad (100.2)$$

$$(100.1) \quad (100.2)$$

¹ Э. X. (1804 — 1865)

$$IR = \dots + \dots \quad (100.3)$$

§101.

(100.3) (100.4)

[(100.3)]

(100.4) $(\mathcal{E}_{12} = 0)$,
(98.1):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}$$

Κυρχγοφα¹.

(§ 97)].

(100.4) I и 2 , $\varphi_1 = \varphi_2$,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R},$$

$$\sum I_k = 0.$$

$\mathcal{E} -$; $R -$

$$R = r + R_1 (r -$$

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

$R_1 -$

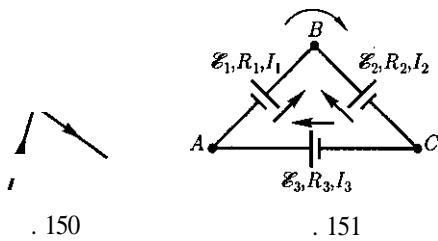
цепь

(100.4) $\varphi_2 - \varphi_1$, т.е.

$(\mathcal{E} = 0)$, $\mathcal{E}_{12} =$

(151).

¹ (1824–1887) —



1. ;
: , TO

2. IR ;

3. ис-
(

$$I_1 R_1 - I_2 \quad 3. (101.1)$$

Уравнение (101.1)

$$I_i$$

$$R_i$$

$$\mathcal{E}_k,$$

$$I_1 - I_2 - I_G = 0. \quad (101.3)$$

, ACD CBDC,

записать:

¹ . Уитстон (1802—1875) —

$$I_r r - I_2 R_2 = I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_G R_G = 0. \quad (101.4)$$

$$(101.3) \quad R_2, R_3 \text{ и } R_4, \quad (I_G = 0).$$

$$(101.4)$$

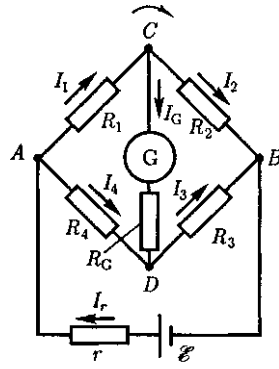
$$I_1 R_1 - I_4 R_4; \quad I_2 R_2 - I_3 R_3. \quad (101.6)$$

$$(101.5)$$

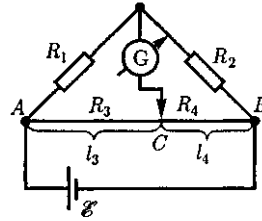
$$\bullet. \quad (101.7)$$

$$(I_G = 0)$$

$$R_1$$



. 152



. 153

$$(101.7),$$

$$R_1 = R_3 \frac{l_4}{l_2}. \quad (101.8)$$

$$l_3 \quad l_4$$

$$\text{, а } R_2 \quad (101.8)$$

$$R_1.$$

используется **реохордный мост Уитстона** (. 153),
 $R_3 \quad R_4$

$$\frac{R_3}{R_4}$$

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

?

—Ленца

?

?

- ? ?
- , ?

12.1. $1 \text{ } ^2$; $1 \text{ } .$

[74 /]

12.2. , , $8,9 \text{ } / ^3 .$

$t_2 = 1200^\circ .$

$3,65 \cdot 10^{-3} \text{ } . [5]$

$t_1 = 20^\circ$

12.3. $0,3 \text{ } ^2$ $0,3 \text{ } .$,

$17 \cdot [2,72 \cdot 10^{-21}]$

12.4.

$/ = 0 \text{ } 30 .$

10

$I_0 = 3$

[900]

12.5.

$5 \text{ } / ^2 .$

26

[65 Дж/(м³·с)]

12.6.

внутреннее

r

$P_1 = 10 \text{ } ,$

$I_2 = 8$

$P_2 = 12 \text{ } . [0,17]$

12.7.

$\mathcal{E}_1 = 1,8 \text{ } , \mathcal{E}_2 = 1,4 \text{ } \mathcal{E}_3 = 1,1 \text{ B}$

$r_1 = 0,4 \text{ } ,$

$-r_2 = 0,6 \text{ } .$

$I_1 = 1,13 \text{ } . [0,2]$

13

§ 102.

(1863 — 1906)

X.

(1901),

(1845—1915) —

(Cu, 1,)

($\approx 3,5 \cdot 10^6$),

1897 .
(1856 — 1940)

(
).

:

« »

(1913)

(1879 1944)
(1880 1947).

1916 .

(1881 — 1948)

[.(44.3)],

(1828—1887).

§ 103.

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}}$$

$$= 300 \quad 1,1 \cdot 10^5 / .$$

1.

= const.

$$F = eE$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m}$$

(v)

(96.1)

$$j = ne(v)$$

$$10^7 / .^2,$$

$$= 8 \cdot 10^{28} \text{ M}^{-3}$$

$\langle v \rangle$

$$7,8 \cdot 10^{-4} / .$$

$$\langle v \rangle \ll f, \dots$$

$$v_{\max} = \frac{eE\langle t \rangle}{m}$$

(t) —

$$\langle (v) + \langle u \rangle \rangle$$

().

$$\langle v \rangle = \frac{v_{\max} + 0}{2} = \frac{eE\langle t \rangle}{2m} \quad (103.1)$$

$$\langle = 3 \cdot 10^8 / . \rangle$$

$$t = \frac{l}{c} (l -$$

(t)

$\langle l \rangle$

(l) —

() + (v)

§ 102

$$\langle v \rangle \ll \langle \dots \rangle$$

$$\langle t \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle u \rangle} \quad (t) \quad n(z)$$

(103.1),

$$\langle v \rangle = \frac{eE\langle l \rangle}{2m\langle u \rangle}.$$

(96.1)

$$j = ne\langle v \rangle = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle u \rangle} E,$$

[(98.4)].

между j

$$\gamma = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle u \rangle}, \quad (103.2)$$

2.

— Ленца.

$$\langle E_k \rangle = \frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{e^2\langle l \rangle^2}{2m\langle u \rangle^2} E^2. \quad (103.3)$$

(z)

$$\langle z \rangle = \frac{\langle u \rangle}{\langle l \rangle}. \quad (103.4)$$

— $n(z)$,

$$w = n\langle z \rangle \langle E_k \rangle, \quad (103.5)$$

(103.3) (103.4) (103.5),

$$w = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle u \rangle} E^2. \quad (103.6)$$

w

(§ 99).

w² (103.2)

(103.6) —

[(99.7)].

3.

(X)

(γ)

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \beta T,$$

(3 —

$$\beta: \beta = 3 \left(\frac{k}{e} \right)^2,$$

1)

(. . .

(. § 73),

3R.

$3/2R.$

$$\beta = 2 \left(\frac{k}{e} \right)^2,$$

4,5R.

3R, . . .

(103.2)

$$\sqrt{T} [(103.2)$$

n и $\langle l \rangle$
 $() \sim /]$.

$$R \sim (. § 98).$$

(103.2) $\gamma,$

$\langle l \rangle$

(,

)

§ 104.

$$\Delta\varphi = \frac{A}{e},$$

1.

(): 1

2.

$$1,6 \cdot 10^{-19}, \quad 1 = 1,6 \cdot 10^{-19}.$$

тем

«

»,

$$= 6,3 \quad = 2,2 \quad =$$

($10^{-10} - 10^{-9}$).

(= 4,5)

(Ca, Sr, Ba),
2

§ 105.

$\Delta\varphi$

потенциала,
()

1.

()

B_a ,

$$U = \dots \quad (155),$$

I

[

(1883—1923)

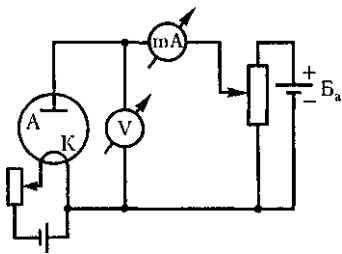
(1881—1957)]:

$$I = BU^{3/2},$$

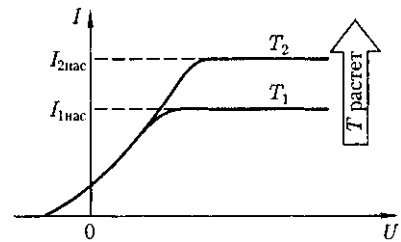
(,),

$I_{нас}$,

. 154,



. 154



. 155

$$j_{\text{нас}} = CT^2 e^{-\frac{A}{kT}},$$

2.

§ 202.

3.

1—1,5
. 155

$$: T_1 \quad T_2, \quad T_2 > T_1.$$

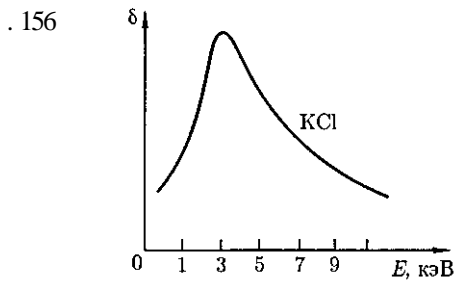
$n_2 K$

$n_1,$

$$U = 0$$

6

δ



δ

Θ_1

Θ_1

Θ_2

δ^n

. 156

4.

1.
 δ

δ

10^3

$10^7 /$

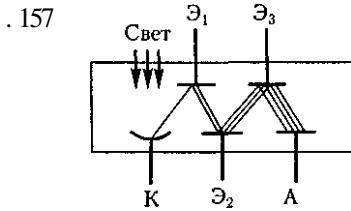
$10^5-10 /$

$\approx 12 (2)$

(),

§ 106.

(рис. 157).



().

(;).

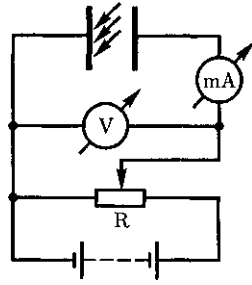
()

ИХ ИЗОЛЯЦИИ.

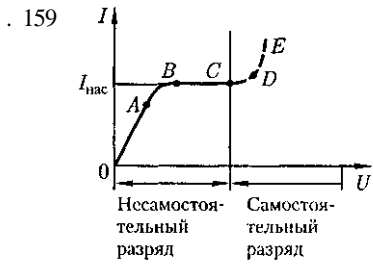
(. 158),

(
γ-излучения),
(
, α-частиц) . . . ()

4—25 .



. 158



§ 106,

(. . 158)
(CD DE

159).

159.
0

(I . 160).

()
()

($I_{нас}$),

CD (. . 159).

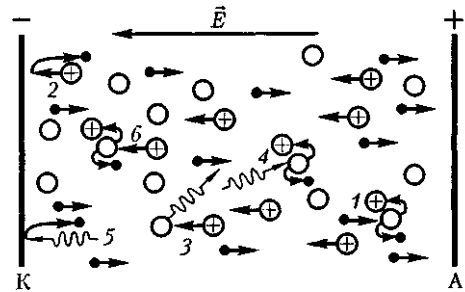
Разряды,

« »

сила (DE)

. 160:

§107.



. 160

1)

(2); 2)

≈5,3—6,7

(3); 3)

≈13

. 161.

(4); 4)

1—

(5).

2—

3—

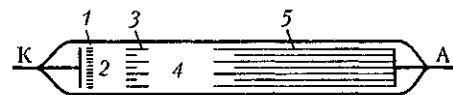
(6),

4—

5—

(DE . 159).

(1—6)



. 161

30—50

$\approx 1,3$

2.

$(\approx 3 \cdot 10^6 /)$

, ()
 ().
).
 ()
 , . ,
 (,). ()
 ,)
 ().
3. .
4. — .
 , ()
 —
 , (,).
 . 30 / ,
 ,
 (,)
 ,
 () .
 3900 .
 — , —
 .
 ,
 (), 1.
 ,
 1 .

$$T_e > T_H$$

§108.

$$L \gg D$$

α —

$$\left(\frac{\alpha - \alpha}{\alpha - 100\%} \right)$$

;
 ;
 ;
 ; « » —
 () —
).

($\approx 10^8$)
 (§ 268).
 плазма ($< 10^5$)

, ,
 , ,
 , ,
 , ,
 — , — (),
 , . . .

•
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •
 •

?
 — ?
 (,).
 ?
 —
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?
 ?

-
-
-
-
-
-

- 13.1. $2,5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$,
 $1 / \dots [0,25 /]$
- 13.2. $4,5$. 2000 2500 .
- [290]
- 13.3. $2,5$. 10^{-18} . [1,15 /]
- 13.4. 200 , 2 , 10 , 1 , 100 .
 $b_+ = 1,4 \text{ cm}^2 / (\text{B} \cdot)$ $_- = 1,9 \text{ cm}^2 / (\text{B} \cdot)$;
- 13.5. $[9,5 \cdot 10^{14} \text{ m}^{-3}]$ $9,6$.
 ИОНОВ, 1 $[3 \cdot 10^7]$

14

§ 109.

X. (1777— 1851)].

« » [

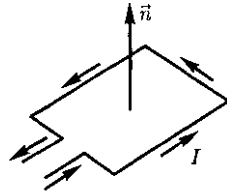


Рис. 162

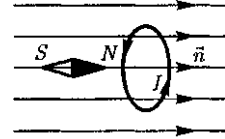


Рис. 163

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}], \quad (109.1)$$

p_m — ; B —

(. 162).

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (109.2)$$

S — ; —

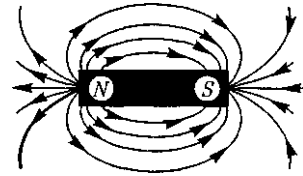
p_m

(. 163).

отношение $\frac{M_{\max}}{p_m}$ (M_{\max} —)

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}$$

B
 (§ 111)
 (§ 114).



B .

« »

« »

. 164,

. 164,

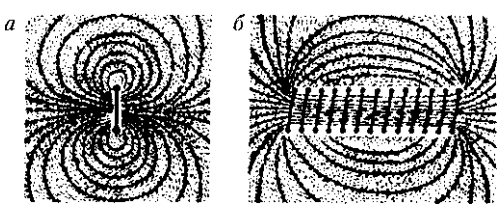
(—)

(—)

(1775—1836),

[(§ 79)].
 . 165

[(§ 79)].
 . 165



B

. 164

$BВ$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3},$$

$\frac{dl}{dl}$

; r —

dl

; r —

r .

dB

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (109.3)$$

$d\vec{l}$ r , . . .

μ_0 —

; μ —

микро-

):

$d\vec{B}$,

электростатического (E и D) и
(B)

dB

E и B

B ,

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \sin \alpha}{r^2}, \quad (110.2)$$

dl r .

D

§ 110.

— —

(1774 —1862)

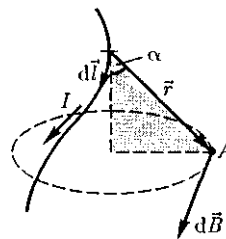
(1791 —1841).

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i. \quad (110.3)$$

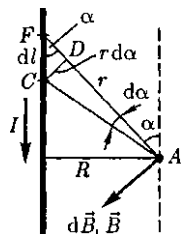
. 166

(. 166)

dB ,



. 167



(B и H)

1.

2.

(. 167).

(. 168).

dB

R ,

dB

(« »).

(sin a = 1)

d/\vec{r} ,

R ,

. 167

(110.2),

$$r = \frac{R}{\sin \alpha}, \quad dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha}$$

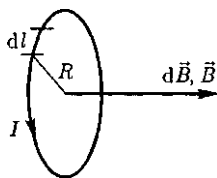
$$dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R^2} dl.$$

(CD FDC $d/$)

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R^2} \int dl =$$

$$= \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R^2} 2\pi R = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

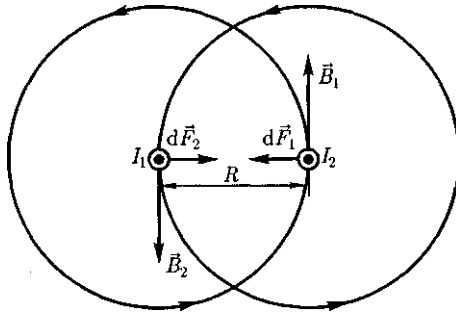
. 168



$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

§ 111.

(§ 109)



. 169

dF,

dl

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}], \quad (111.1)$$

d \vec{l} — dl

, B —

$$(111.1), \quad dF$$

B,

[(111.1)]

$$dF = IBdl \sin \alpha, \quad (111.2)$$

— d \vec{l} dB.

I₂ (. 169

I₁

),
R.

dF_{2, c}

I₂

I₁,

по

$$dF_2 = I_1 B_2 dl = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi R} dl. \quad (111.4)$$

$$(111.4) \quad dF_1 = dF_2, \quad (111.3) \quad B = \frac{1}{I} \frac{dF}{dl}.$$

$$dF = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R} dl. \quad (111.5)$$

§ 112.

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{R}. \quad (112.1)$$

μ_0

$$I_1 = I_2 = 1 \quad \frac{dF}{dl} = 2 \cdot 10^{-7} / R \quad (112.1),$$

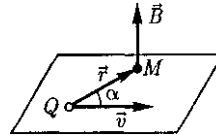
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гл}^2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гл}^2 / \text{А}^2.$$

() (§ 126).'

[(111.2)]
— $IBdl$,

$$dF = \vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Q[\vec{v} \vec{r}]}{r^3}, \quad (113.1)$$

170). $r = \frac{Q}{K}$, (113.1),



. 170

v , : . . . (1863—1944),

$v \ll c$. B (113.1)

$$B = \frac{\mu_0 I Q v}{4\pi r^2} \sin \alpha, \quad (113.2)$$

(113.1), $\vec{v} \perp r$. (110.1)

§114.

(113.2) $(v \ll c)$ (113.1)

(§ 111),

(113.1)

$$\vec{F} = Q[\vec{v}\vec{B}], \quad (114.1)$$

v . B — Q v — B

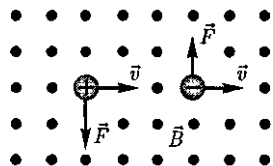
B —

$I = v (\begin{matrix} Q > 0 \\ Q < 0 \end{matrix})$

(1848—1901).

. 171

v , (



) F § 115.

[(114.1)] (114.1)

$F = QvB \sin \alpha,$

— $v B.$
(§ 109),

Q

(114.1)

(§ 109) $B.$

$v B$, 0 $\pi.$
(114.1)

$F = Q[\vec{v}B]$ $B,$ $v,$

ПОМИМО B

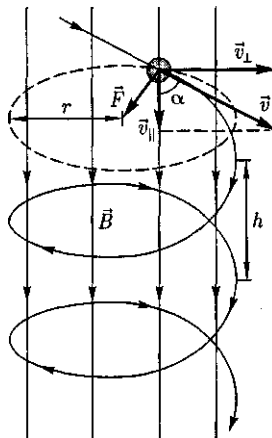
$F,$

$QvB = \frac{mv^2}{r},$

$\vec{F} = Q\vec{E} + Q[\vec{v}\vec{B}].$ $r = \frac{m v}{Q B}.$ (115.1)

$$T = \frac{2\pi r}{v} \tag{115.1}$$

$$T = \frac{2\pi m}{B Q} \tag{115.2}$$



(—)
($v \ll c$)

(§ 116)
части-
 α \vec{B}

(. 172),
1)
= $v \cos \alpha$; 2)
 $v_{\perp} = v \sin \alpha$

$v_{\parallel} =$ §116.

(115.1) (
 $v_{\perp} = v \sin \alpha$).

(. 172).

$$h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha.$$

(115.2),

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{B Q}$$

СТИ

И

линейные,

(1 2)

1.

(§ 92).

$$W = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$[\dots (115.1)]$$

≈ 10

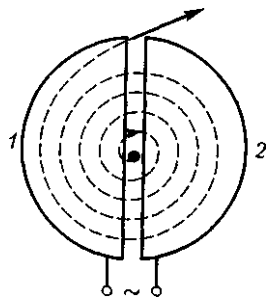
2.

3.

(,)

. 173.

. 173



25

1944
 (1907 — 1966) 1945 500
1991) (1907 — 7. —
 (. § 137),

4. () — $W > 100$ 100

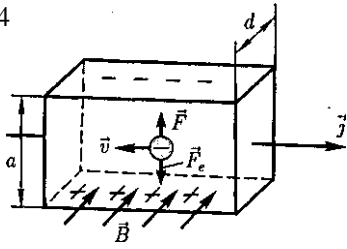
(
 , α -частиц),
 20 50

§117.

*Холла*¹ (1879) —
 ()
 1 ()
B, *j*,
B и *j*.
 5. — *j*
B, *j* (. 174).
j
 —

5—10 (. § 114),

6. —
 (,), (— (.
 ,
¹ (1855—1938) —



).

E_B ,

E_B

$$eE_B = \frac{e\Delta\varphi}{a} = evB, \text{ или } \Delta\varphi = vBa,$$

— ; $\Delta\varphi$ —
 ()
 $I = jS = nevS$ (S — , d, n — , v —),

$$\Delta\varphi = \frac{I}{nead} Ba = \frac{1}{en} \frac{IB}{d} = R \frac{IB}{d}, \quad (117.1)$$

$$(117.1) R = \frac{1}{en} \frac{I}{d}$$

: 1)

(); 2)

(. § 242, 243),

§ 118.

(. § 83)

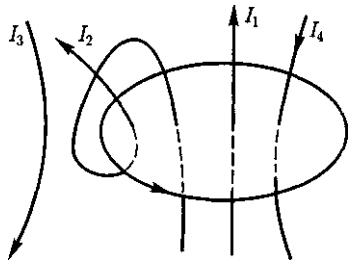
$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl,$$

$d\vec{l}$ —
 ; $B_l = B \cos \alpha$ —
 () ; —
 $B d\vec{l}$.

B (B):

μ_0

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k, \quad (118.1)$$



. 175

L

Согласно выражению (118.1), получим $B \cdot 2\pi r = \mu_0 I$ (в вакууме), откуда

$$\oint_L B_1 dl = \oint_L B dl = B \oint_L dl = B \cdot 2\pi r.$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

(110.5)].

(118.1)
 $B,$

(83.3)

. 175,

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + 2I_2 - 0 \cdot I_3 - I_4.$$

(118.1)

B

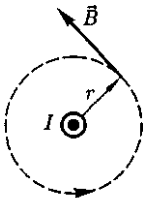
— Лапласа.

(. 176).

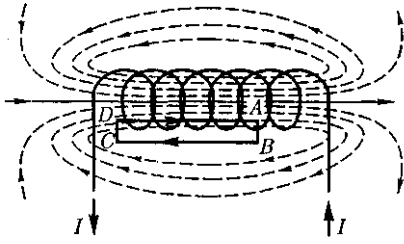
$r.$

§ 119.

. 176



ЛВИТКОВ,
(. 177).

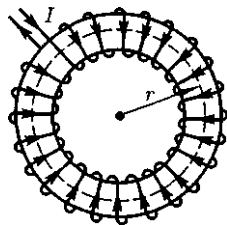


. 177

...
 . 164, б) поле
 . 177

. 177. ABCDA, B
 N ABCD, (118.1),

$$\oint_{ABCD} B_l dl = \mu_0 NI.$$



. 178

ABCD

, , CD DA. CD

$$B_l = 0. \\ = 0. DA \\ B Bl ($$

); ,

$$\int_{DA} B_l dl = Bl = \mu_0 NI. \quad (119.1)$$

(119.1)

():

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}. \quad (119.2)$$

(,)

()

Био—Савара—Лапла

(119.2).

(. 178).

$$r. \\ (118.1), B \cdot 2\pi r =$$

$$= \mu_0 NI, \quad (120.1)$$

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS. \quad (120.2)$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r},$$

N —

$$\cdot 2\pi r = 0.$$

B, B_n — const

$$\Phi_B = BS.$$

§ 120.

B

$$\mathbf{1} \quad (1 = 1 \cdot \vec{T}_L \cdot \vec{B}).$$

$$(dS)$$

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS, \quad (120.1)$$

$$\int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS = 0. \quad (120.3)$$

$$B_n = \cos \alpha = \frac{B}{dS}$$

$$= dS \vec{n} = dS,$$

нормали к B

B и

$$\cos \alpha = \frac{B_n}{B} \quad (81.2).$$

$$[\quad (120.3),$$

(§ 109):

$$\mu, \quad (119.2),$$

ПОТОК.

, всегда

$$B = \frac{\mu_0 l NI}{l}$$

Φ_B
 S равен

S

$$\Phi_1 = BS,$$

$$\Psi = \Phi_1 N = NBS = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S. \quad (120.4)$$

§ 121.

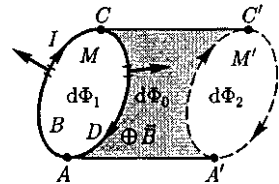
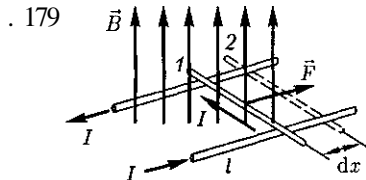
(§111).
(
, 179),

(
l I
)

[(111.2)],

$$F = IBl.$$

2. dx I



$$dA = Fdx = IBldx = IBdS = Id\Phi,$$

$$ldx = dS -$$

$$; BdS = d\Phi -$$

$$dA = Id\Phi, \quad (121.1)$$

B.

; 180

()

()

Ммысленно

: ABC CD
dA,

ABC (dA₁) CDA
(dA₂), т.е.

$$dA = dA_1 + dA_2. \quad (121.2)$$

$$(121.1), \quad \overset{CDA}{dA_2} > 0. \quad (121.2), \quad (121.3) \quad (121.4)$$

$$dA = I(d\Phi_2 - d\Phi_1),$$

$$d\Phi_2 - d\Phi_1 = d\Phi' -$$

$$\overset{CD}{d\Phi_0} \quad d\Phi_2, \quad dA = Id\Phi'. \quad (121.5)$$

$$(121.5),$$

$$dA_2 = I(d\Phi_0 + d\Phi_2). \quad (121.3)$$

$$\overset{ABC}{d\Phi_0} \quad d\Phi_1, \quad A = I\Delta\Phi, \quad (121.6)$$

$$dA_1 < 0.$$

$$\overset{ABC}{d\Phi_0} \quad d\Phi_1, \quad (121.6)$$

$$dA_1 = -I(d\Phi_0 + d\Phi_1). \quad (121.4)$$

• ?

• ? ? B?

• ?

• — — — Савара—Лапласа, : 1) ;

2)

•

•

• ?

• ?

• ?

• B $\frac{\pi}{2}$? ,
 • ? ?
 • ? ?
 • ? ?
 • ? ?
 • ?
 • ? $B?$
 • , и $B?$
 • ?
 • ? $B,$
 • ?
 • ?

14.1. $\frac{15}{10}$ / . 12 , 8 c^{-1}

• [251 /]

14.2. 3 , 60 , [5,66]

14.3. 25 , 20 30 , $r_1 = 30$, $r_2 = 40$
 • [9,5]

14.4. 10 , по 10 , 15
 • [10,7]

14.5. , $3R$, R .

= 220 , [10]
 14.6. , 0,5 ,

• [3,23]

14.7. , ,
 - 10 / , - 0,2 , [50 /]

- 14.8. $1 \cdot 10^{10} \cdot [> 47]$
- 14.9. $0,1$, $0,5$, 5 .
- 14.10. $8,93 / \text{с}^3 \cdot [1,85]$ ()
- 14.11. 15 , $[20 \text{ B}]$, B ,
- 14.12. $40 \cdot [0,24 \text{ ; } 191 \text{ A/M}]$ 1 . 60 , —
 $14.12.$) $\frac{5}{[1 \cdot \text{с}^2]}$ $l = 25$. (p_m)
- 14.13. $(= 0,2)$, 90° 20 с^{-1} $0,6$ • . : 1) ,
 ; 2) $[1) 1,5 \text{ ; } 2) 3 \cdot 10^{-6} \cdot \text{с}^2]$

15

§ 122.

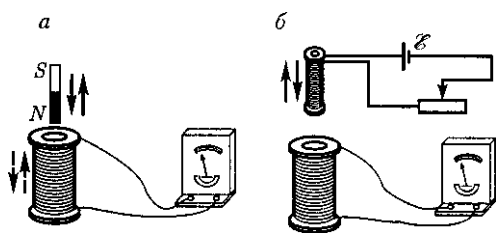
()

. 14 ,

I(.181,).

); (

1831 .



.181

§ 123.

(.181,).

\mathcal{E}_i

$$\mathcal{E}_i \sim \frac{d\Phi}{dt}. \quad (123.1)$$

\mathcal{E}_i

§ 120

(. § 109).

$\mathcal{E}_i \Phi t$

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (123.2)$$

(123.2)

R —

$$\begin{aligned} & \Leftrightarrow \\ \mathcal{E}_i < 0, \dots & \left(\frac{d\Phi}{dt} > 0 \right) \\ & ; \\ & \left(\frac{d\Phi}{dt} < 0 \right) ; \mathcal{E}_i > , \\ & \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{\mathcal{E} - \frac{d\Phi}{dt}}{R}, \\ -\frac{d\Phi}{dt} &= \mathcal{E}_i, \\ & [\dots (123.2)]. \\ & : \mathcal{E}_i \end{aligned}$$

(123.2)
(1833) —

(123.2)

$$\begin{aligned} \left[\frac{d\Phi}{dt} \right] &= \frac{B\delta}{c} = \frac{T\lambda \cdot M^2}{c} = \frac{H \cdot M^2}{A \cdot M \cdot c} = \\ &= \frac{Дж}{A \cdot c} = \frac{A \cdot B \cdot c}{A \cdot c} = B. \end{aligned}$$

179).

$$\left(\vec{F}, \dots \right)$$

(
179)

da;

$$[\dots (121.1)] dA = Id\Phi, \text{ где}$$

dΦ —

$$\begin{aligned} (\mathcal{E}Idt) & \quad dt \\ (I^2Rdt) & \quad (\\ (Id\Phi): & \quad) \end{aligned}$$

$$\mathcal{E}Idt = I^2Rdt + Id\Phi,$$

(1821 — 1894) —

$$\omega = \text{const.}$$

$$S, \quad (120.1),$$

$$\Phi = B_n S = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t,$$

$$- \omega t -$$

$$t (\quad t = 0 \quad = 0).$$

ЭДС

$$[\quad (123.2)]$$

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t, \quad (124.1)$$

E_B

L

ЭДС \mathcal{E}_i

$$\sin \omega t = 1, \quad \dots$$

$$\mathcal{E}_{\max} = BS\omega. \quad (124.2)$$

$$(124.2), \quad (124.1)$$

$$\mathcal{E}_i = \mathcal{E}_{\max} \sin \omega t.$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (123.3)$$

§ 124.

$$(124.2)$$

$$\mathcal{E}_{\max} (\quad , \quad)$$

ω , и S .

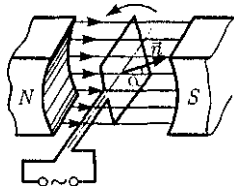
$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 50 \text{ Гц},$$

$$(\quad . 182).$$

$$(= \text{const})$$

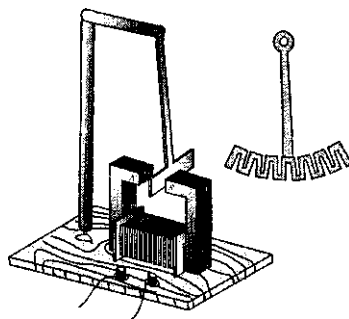
B

Рис. 182



. 182.

(109.1)



. 183

§ 125.

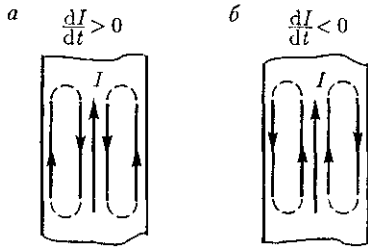
() ()

(. 183),

184,

. 184, —

{)



.184

$L =$

$$(126.1)$$

$1 =$

$$1 = 1 / = 1 \cdot / .$$

(120.4),

$$\mu_0 l \frac{N^2 I}{l} S .$$

(126.1),

$$L = \mu_0 l \frac{N^2 S}{l} , \quad (126.2)$$

§ 126.

(110.2)],

$$\Phi = LI, \quad (126.1)$$

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right).$$

(
,
, $L = \text{const}$

$$\mathcal{E}_s = -L\frac{dI}{dt}, \quad (126.3)$$

« \leftrightarrow »

$$\frac{dI}{dt} > 0 \text{ и } \mathcal{E}_s < 0, \dots$$

$$-\langle 0 \quad \mathcal{E}_s > 0, \dots$$

§ 127.

самондукции.

$\mathcal{E},$ R
 $L.$

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

(
,
, $t = 0$

L

$$\mathcal{E}_s = -L\frac{dI}{dt},$$

$$I = \frac{\mathcal{E}_s}{R},$$

$$IR = -L\frac{dI}{dt}. \quad (127.1)$$

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt, \quad (127.1)$$

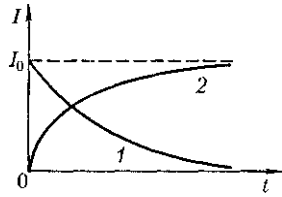
$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{Rt}{L}, \quad I \text{ (от } I_0 \text{ до } I) \quad t$$

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (127.2)$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ — постоянная, называемая

$$(127.2)$$

Рис. 185



$$(127.2)$$

185.

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt},$$

$$IR - \mathcal{E} + \mathcal{E}_s,$$

$$IR = \mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}.$$

$$u = IR - \mathcal{E},$$

$$\frac{du}{u} = -\frac{dt}{\tau},$$

где τ — время релаксации.

В момент замыкания ($t = 0$) сила тока $I = 0$ и $u = -\mathcal{E}$. Следовательно, интегрируя по u (от $-\mathcal{E}$ до $IR - \mathcal{E}$) и t (от 0 до t), находим $\ln \frac{IR - \mathcal{E}}{-\mathcal{E}} = -\frac{t}{\tau}$, или

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (127.3)$$

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R} \quad (t \rightarrow \infty).$$

$$(127.3)$$

185.

$$I = 0$$

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$\mathcal{E}_s,$

$$R_0 \quad R,$$

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R}.$$

$$(127.2).$$

I_0

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_0} e^{-\frac{Rt}{L}}.$$

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt} = \frac{R}{R_0} \mathcal{E} e^{-\frac{Rt}{L}},$$

$$\left(\frac{R}{r} \gg 1\right),$$

§ 128.

(1 и 2),

I течет I_1 , магнитный
создаваемые I_1 , (

Φ_{21}

2.

$$\Phi_{21} = L_{21} I_1, \quad (128.1)$$

L_{21} —

2 I_1 конту-
по \mathcal{E}_{i2} [(123.2)]

первом Φ_{21} ,
:

$$\mathcal{E}_{i2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

2 I_2

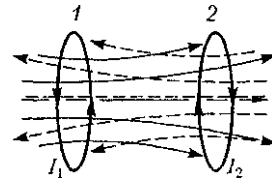
Φ_{12} — I_2 , то

$$\Phi_{12} = L_{12} I_2.$$

I_2 индуцируется ЭДС \mathcal{E}_{i1} ,

Φ_{12} ,

$$\mathcal{E}_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}.$$



L_{21} и L_{12}

, что

$$L_{12} = L_{21}. \quad (128.2)$$

метрической L_{21} и L_{12}

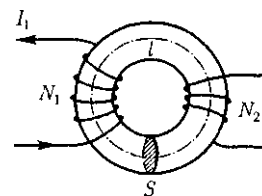
, — $(\Gamma\Pi)$.

(. 187).

$$(119.2), \quad B = \mu_0 \mu \frac{N_1 I_1}{l}, \quad l —$$

$$\Phi_2 = BS = \mu_0 \mu \frac{N_1 I_1}{l} S.$$

N_2



$$\Psi = \Phi_2 N_2 = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S I_1.$$

$$\Psi = I_1 L_{21} \quad (128.1)$$

$$L_{21} = \frac{\Psi}{I_1} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S. \quad (128.3)$$

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S. \quad (128.3)$$

$$L_{12} = L_{21} = \mu_0 \mu \frac{N_1 N_2}{l} S.$$

§129.

$$\mathcal{E}_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (129.1)$$

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d(N_2 \Phi)}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (129.2)$$

(1847—1894)

(1855—1919).

(129.2),

$$\left(\begin{array}{c} 188. \\ N_1 \quad N_2 \end{array} \right),$$

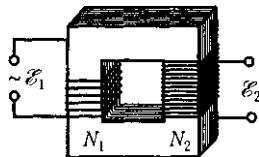
$$\mathcal{E}_2 = -\frac{N_2}{N_1} \mathcal{E}_1, \quad (129.3)$$

«—»

\mathcal{E}
 I_1 ,

$\frac{N_2}{N_1}$,

.188



2 %

вторичная

§ 130.

$$\mathcal{E}_2 I_2 \approx \mathcal{E}_1 I_1,$$

(129.3),

поле,

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1},$$

поля

— > 1,

ЭТОГО ПОЛЯ.

L , /.

[(126.1)] $\Phi =$, при

$$\frac{d\Phi}{dt} = LI \frac{dI}{dt}.$$

); $\frac{N_2}{N_1} < 1$,

$$\frac{d\Phi}{dA} = \frac{1}{l} LI \frac{dI}{dA} = LI \frac{dI}{dA}.$$

$$A = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}.$$

4—5

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (130.1)$$

полей,

Электрическое поле	Формулы и обозначения	Магнитное поле	Формулы и обозначения
Точечный заряд	Q	Элемент проводника с током	Idl
Взаимодействие точечных зарядов	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$	Взаимодействие токов	$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi r^2} dl$
Электрическая постоянная	ϵ_0	Магнитная постоянная	μ_0
Силовая характеристика электрического поля	$E = \frac{F}{Q_0}$	Силовая характеристика магнитного поля	$B = \frac{M_{\max}}{p_m}$
Однородное электрическое поле	$\vec{E} = \text{const}$	Однородное магнитное поле	$\vec{B} = \text{const}$
Принцип суперпозиции	$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i$	Принцип суперпозиции	$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$
Линии напряженности вектора \vec{E}	—	Линии магнитной индукции	—
Поляризованность	$P = \frac{\vec{p}_v}{V} = \frac{\sum \vec{p}_i}{V}$	Намагниченность	$\vec{j} = \frac{\vec{p}_m}{V} = \frac{\sum \vec{p}_a}{V}$
Емкость одиночного проводника	$C = \frac{Q}{\varphi}$	Индуктивность катушки	$L = \frac{\Phi}{I}$
Энергия заряженного конденсатора	$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2}$	Энергия катушки с током	$W = \frac{LI^2}{2}$
Диэлектрическая проницаемость	ϵ	Магнитная проницаемость	μ
Объемная плотность энергии	$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}$	Объемная плотность энергии	$w = \frac{W}{V} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}$
Поток вектора \vec{E} сквозь поверхность S	$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS$	Поток вектора \vec{B} сквозь поверхность S	$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = \oint_S B_n dS$
Циркуляция вектора \vec{E}	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_t dl$	Циркуляция вектора \vec{B}	$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_t dl$

-
-

?

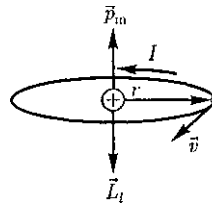
- 15.1. (=2 пОм•) 20 , 0,5 . [0,33 /]¹ .
- 15.2. 300 мИИ⁻¹ , 200 , 100² .
- 15.3. [31,4] 0,3 1 , 1 .
- [3040]
- 15.4. 0,98 10 И
- 15.5. 0,4 ГИ. [0,16] (L₁ = 0 , L₂ = 0,64 ГИ)
- 15.6. [0,48] U₁ = 5,5 U₂ = 220 , N₁ = 1500 R₂ = 2 . (R = 13)
- [68] ОБМОТКЕ

16

§ 131.

μ.

(. § 109),



(109.2) $p_m = IS\vec{n}$,

$p_m = IS = evS$, (131.1)

$I = ev$ — ; v — ; $S = \pi r^2$ (131.4)

(189),

p_m

()

(1915),

по

(19.1), L_l

$L_l = mvr = 2m\nu S$, (131.2)

$v = 2\pi\nu r$, $\pi r^2 = S$. L_l (

)

$-\frac{e}{m}$.

Из рис. 189 p_m и \vec{L}_l

(131.1) (131.2),

[(131.4)].

$\vec{p}_m = -\frac{e}{2m}\vec{L}_l = g\vec{L}_l$, (131.3)

$g = -\frac{e}{2m}$ (131.4)

(1878 1960)

[(131.1) (131.2)]

$$L_{ls}$$

$$\vec{p}_a = \sum \vec{p}_{in} + \sum \vec{p}_{ms} \quad (131.6)$$

$$p_{ms} \quad L_{ls}$$

$$\vec{p}_{ms} = g_s \vec{L}_{ls} \quad (131.5)$$

g_s

§ 132.

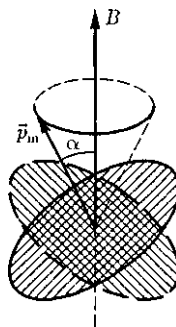
B

$$p_{msB} = \pm \frac{e\hbar}{2m} = \pm \mu_B,$$

где $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h — постоянная Планка);
 μ_B —

B

. 190



α (. 190),

$B,$

$P_m,$

B

(

,

(

()

,

Pt, Al . . .

[(]

Ag ,), (, Bi, () § 87),

$$\begin{aligned}
 & B_0 \\
 & (\quad) \\
 & (\quad) \\
 & \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}', \quad (133.1) \\
 & \vec{B}_0 = \mu_0 H \text{ [см. (109.3)].}
 \end{aligned}$$

§ 133.

§ 88),

, определяемую

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{p}_a}{V},$$

$$\vec{P}_m = \sum \vec{p}_a$$

[. (131.6)].

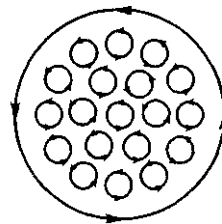
(. § 109),

$B,$

$\vec{B}_0,$
 $\vec{B}_0 ($ p_m антипа-
 $B_0 ($

191).

.191



можно вы-
(119.2)
):

$$B = \mu_0 \frac{I'}{l}, \quad (133.2)$$

$I' =$; $l =$;
 $\mu_0 = 1 =$

$$\frac{I' l S}{P_m} = \frac{I' V}{V}, \quad P_m =$$

$$J = \frac{P_m}{V} = \frac{I'}{l}. \quad (133.3)$$

(133.2) (133.3),

, что

$$B' = \mu_0 J,$$

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J}.$$

(133.1), B_0 и B'

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}), \quad (133.4)$$

или

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{H} + \vec{J}. \quad (133.5)$$

, несильных

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (133.6)$$

$\chi =$

χ
(
)
(
).

$$(133.4) \quad (133.6),$$

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}, \quad (133.7)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 (1 + \chi)}.$$

$$\mu = 1 + \chi \quad (133.8)$$

$$(133.8)$$

(133.7),
(109.3) $B = \mu_0 \mu H,$

диа-
(
 $10^{-4} - 10^{-6}$), μ

$$\begin{matrix} \chi < 0 & \mu < 1, \\ \chi > 0 & \mu > 1. \end{matrix}$$

(118.1):

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 (I + I'),$$

I I'

L .

B

§ 134.

ЭТИМ

В И

\vec{B} характери-

$(\mu_1 \text{ и } \mu_2)$

(),

$I \text{ и } 2$

B

(192).

AS

J по L

B (120.3),

$$B_{n1} \Delta S - B_{n2} \Delta S = 0$$

ни к

$$\oint_L \vec{J} d\vec{l} = I'$$

$$B_{n1} = B_{n2}. \quad (134.1)$$

$B = \mu_0 \mu H$

B

H ,

$\mu_0 \mu$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \right) d\vec{l} = I, \quad (133.9)$$

$$\frac{H_{n1}}{H_{n2}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (134.2)$$

7,

1 2

ABCD

l ,

(133.9),

(133.5),

(133.10)

193.

77,

77

H по L

$$\oint_{ABCD} \vec{H} d\vec{l} = 0$$

(),

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I. \quad (133.10)$$

(133.10)

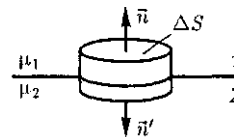


Рис. 192



Рис. 193

$$H_{\tau 1} l - H_{\tau 2} l = 0$$

(CD , , , ...

DA ,

$$H_{\tau 1} = H_{\tau 2}. \quad (134.3)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

$$\frac{B_{\tau 1}}{H_{\tau 2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (134.4)$$

$$B(B_n) \quad (133.6) \quad . 194],$$

(H_{τ})

$$B(B_{\tau}) \text{ и } (H_{\tau})$$

$$(134.1) - B$$

(134.4)
 H

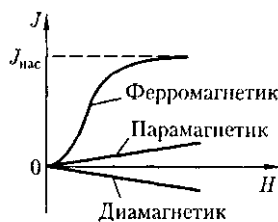
(. § 90),

$B($, $):$

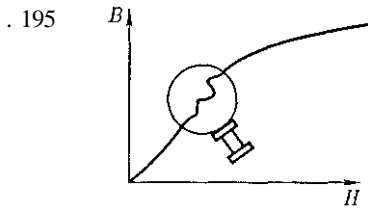
$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_2}{\operatorname{tg} \alpha_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (134.5)$$

B H

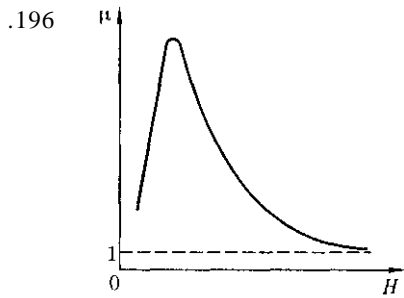
§ 135.



. 191



$J = J_{нас} = \text{const}$ с ростом H отношение $\frac{J}{H} \rightarrow 0$, а $\mu \rightarrow 1$.



[(133.4)] $\mu = \mu_0(H + J)$
растет

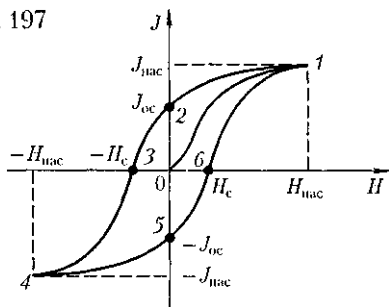
J , полях,
($J = J_{нас}$),

(195).

μ (— 5000,
— 800 000!),
 μ (рис. 196).
 μ II,

$$1 \left(\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = 1 + \frac{J}{H} \right)$$

Рис. 197



J H (,)
(197, 1),
 $1-2$,
 $1-0$.
 $J_{ос}$.
 H_c ,
 H_c ,
(3-4),
 $= -H_{нас}$ (4),
(4-5-6)
(6-1).
 J
1-2-3-4-
5-6-1,
(« »).
 J .

§ 136.

$$H_c (1 - 2 / \dots)$$

μ_{max} — J_{oc}

(1865—1940).

(1901—1976).

которой

II

(§ 75).

магнитострикции (1842).

(§ 194)
(§ 195)

μ

ПОЛЮ.

(§ 196).

. 195.

. § 131).

(. 197).

другу,

(. § 70),

(. §91).

$10^{-4} - 10^{-2}$

FeCl₂)

(MnO, MnF₂),

(FeO,

, Ni, Cu, Mg, Zn, Cd, Fe).

() ,

() .

II (. § 75).

— Me • Fe₂O₃,
(,

Me —

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

? ? ?

? ? ?

? ? ?

? ? ?

? ;

: 1) \vec{B} ; 2) \vec{H} ; 3) \vec{J} .

B H

(134.5).

? ? ?

? ? ?

16.1.

10 / .

$$|| = 8,8 \cdot \text{ }^8. [1,11]$$

(. 1904) —

16.2. 50 ,
 1,5 .
 3,4 • 10⁻³ [5,1 /]
 16.3. 2 . 20 , 10² 400 ,
 : 1) ; 2) . [1]5 ;
 2) 20 /]
 16.4. 0,5 (B₀—
 = 1).
 2,1 • 10⁻⁵ [8,75 •²]

17

§ 137.

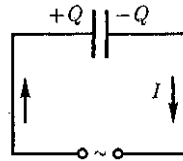
$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$ [. (123.2)]
 « »
 (123.3),

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = \oint_L E_{Bl} dl = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (137.1)$$

$$E_{Bl} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (137.1)$$

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} \quad (120.2),$$

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} d\vec{S}.$$



$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}, \quad (137.2)$$

$$(83.3), \quad \int_s \vec{B} d\vec{S}$$

(E_Q)

$$\oint_L \vec{E}_Q d\vec{l} = \oint_L E_{Qi} dl = 0. \quad (137.3)$$

(137.1)

(137.3),

($E_B \neq E_Q$)

существовал

E_B
 E_Q

E_B ,

(/)

(I_{cm})

: $I = I_{cm}$.

(§ 118),

§ 138.

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \int_s \sigma dS = \int_s \frac{\partial \sigma}{\partial t} dS = \int_s \frac{\partial D}{\partial t} dS \quad (138.1)$$

D [(92.1)].
(138.1)

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S},$$

(§ 198).

$$I = \int_s \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{S}.$$

$$= \int_S \vec{j}_{\text{CM}} d\vec{S} \quad [\dots (96.2)], \quad I =_{\text{CM}} = \dots, \quad \text{вектора } \vec{j}_{\text{CM}} \quad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

$$\vec{j}_{\text{CM}} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (138.2) \quad (138.2).$$

$$(138.2)$$

(j и j_{CM}).
(. 199,)

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} > 0, \dots \quad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad D. \quad \dots \quad 199$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \text{ и } \vec{j} \text{ сов-} \quad (89.2), \quad D = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad \vec{E}'$$

а $P -$ (. § 88),

199,)

$$\vec{j}_{\text{CM}} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}, \quad (138.3)$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} < 0, \dots \quad \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \quad ; \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} -$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \vec{D}. \quad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \vec{j}. \quad -$$

j ,

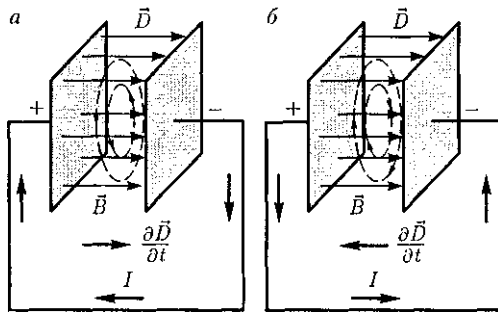


Рис. 199

$$\left(\epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right),$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \quad (138.4)$$

(138.4)

§139.

(138.3),

$$\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

1. (§ 137)
(EQ),

(\vec{E}_B),

$-\vec{E}_Q + \vec{E}_B$
 \vec{E}_Q

[(137.3)],
 E_B

(137.2),

$$\oint_L \vec{E}_B d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

теорему
[(133.10)],

$$= \int_S \vec{j}_{\text{полн}} d\vec{S} \quad I_{\text{полн}} = S,$$

2.

[(138.4)]:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}.$$

$\epsilon_0 \mu_0$ —

; $\epsilon \mu$ —

; γ —

3.
(89.3):

D [.

(

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q. \quad (139.1)$$

(139.1)

— const)

(— const

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV.$$

4.
(120.3):

B [.

$$\int_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0; \quad \oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q;$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I; \quad \int_S \vec{B} d\vec{S} = 0,$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \quad \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV;$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}; \quad \int_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

$$\oint_L \vec{A} d\vec{l} = \int_S \text{rot } \vec{A} d\vec{S}; \quad \oint_S \vec{A} d\vec{S} = \int_V \text{div } \vec{A} dV,$$

(

):

(

):

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad \vec{j} = \gamma \vec{E},$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{div } \vec{D} = \rho;$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \text{div } \vec{B} = 0.$$

(§ 138),

$$= 3 \cdot 10^8 \text{ / .}$$

(§ 90, 134):

$$D_{n1} = D_{n2}; E_{\tau1} = E_{\tau2}; B_{n1} = B_{n2}; H_{\tau1} = H_{\tau2}$$

Г. Герцем (1857—1894),

электромагнитных

принципом

инерциальных

, , ,

,

,

.

.

,

:

,

,

, , *D, H*

,

.

,

,

.

,

,

,

. ,

,

,

,

,

,

,

.

•

?

?

•

?

•

?

?

•

,

,

•

•

•

?

•

?

?

•

§140.

1944) . . . (1879 —

() ,

(,) .

() .

: 1) ,

; 2)

(,

)

.
s

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (140.1)$$

(1842 1919), . . . ,

(1866 1912).

; ω_0 — (

$$(\omega_0 t + \varphi)$$

$$\nu = \frac{1}{T}, \quad (140.3)$$

$$t. \quad \varphi$$

$$(140.2) \quad (140.3),$$

$$(t = 0).$$

$$\omega_0 = 2\pi\nu.$$

$$- \quad () : \mathbf{1} \quad -$$

1

$$+1 \quad -1, \quad s$$

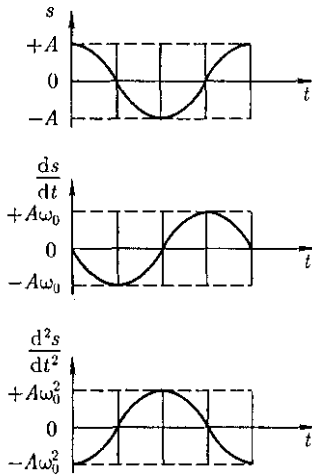
s:

$$\begin{aligned} \frac{ds}{dt} &= -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right); \end{aligned} \quad (140.4)$$

$$\omega_0(t + T) + \varphi = (\omega_0 t + \varphi) + 2\pi,$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2s}{dt^2} &= -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi), \end{aligned} \quad (140.5)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (140.2)$$



$$(140.4) \quad (140.5)$$

$$A\omega_0 \quad A\omega_0^2.$$

$$(140.4)$$

$$(140.1) \quad \frac{\pi}{2};$$

$$(140.5)$$

$$(140.1)$$

$$s=0, \quad \frac{ds}{dt}$$

$$;$$

s

$$\frac{d^2s}{dt^2}$$

$$(\quad . \quad 200;$$

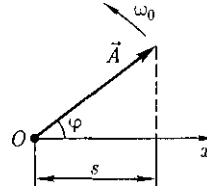
$$(140.5)$$

$$\varphi = 0).$$

. 200

$$\frac{d^2s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0, \quad (140.6)$$

(140.1).



.201

$$\text{Re}(\tilde{s}) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) = s$$

Re

(140.8)

$$s = A e^{i(\omega_0 t + \varphi)}$$

(.201).

ω_0 ,

$$- \quad + \quad , \quad x$$

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi).$$

§ 141.

A ,

φ ,

ω_0

t

$$(140.1), \quad s = :$$

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (141.1)$$

(140.4)

и ускорение ,

$$e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha, \quad (140.7) \quad (140.5),$$

$$i = \sqrt{-1} -$$

(140.1)

$$\tilde{s} = A e^{i(\omega_0 t + \varphi)}. \quad (140.8)$$

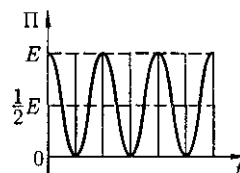
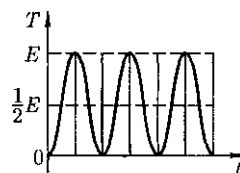
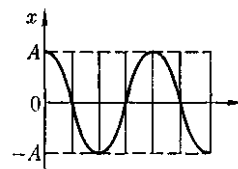
(140.8)

$$\begin{aligned} v &= -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= A\omega_0 \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right); \end{aligned} \quad (141.2)$$

$$\begin{aligned} a &= -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \varphi + \pi). \end{aligned}$$

$F = \dots$,
 сои , (141.1) (141.2)

$$F = -m\omega_0^2 x.$$



$$T = \frac{mv^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2} \sin^2(\omega_0 t + \varphi), \quad (141.3)$$

или

$$T = \frac{mA^2\omega_0^2}{4} [1 - \cos 2(\omega_0 t + \varphi)]. \quad (141.4)$$

$$(141.4) \quad (141.6)$$

, T и Π $2\omega_0$,

F ,

$$\begin{aligned} \Pi &= -\int_n^x F dx = \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} = \\ &= \frac{mA^2\omega_0^2}{4} \cos^2(\omega_0 t + \varphi), \quad (141.5) \end{aligned}$$

или

$$\Pi = \frac{mA^2\omega_0^2}{4} [1 + \cos 2(\omega_0 t + \varphi)]. \quad (141.6)$$

$$(141.3) \quad (141.5),$$

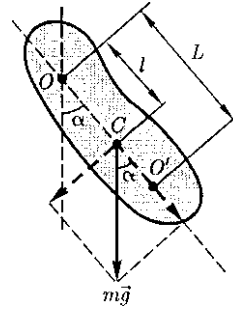
$$E = T + \Pi = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}. \quad (141.7)$$

На . 202
 $(\sin^2 a) = (\cos^2) =$,
 (141.3), (141.5) (141.7)
 $\langle T \rangle = \langle \Pi \rangle = \frac{1}{2} E.$

§ 142.

(140.6):

$$\ddot{s} + \omega_0^2 s = 0. \quad (142.1)$$



1. Столь (§ 146).

пружинке
 $F = -kx,$

$$m\ddot{x} = -kx, \text{ или } \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0. \quad (18.3)$$

(142.1) (140.1)

$$= A \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (142.2)$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (142.3)$$

(142.3)

[(21.3)],

(141.5) (142.2),

$$\Pi = \frac{kx^2}{2}.$$

2.

горизонтальной

$$M = J\epsilon = J\ddot{\alpha} = -mgl \sin \alpha \approx -mgl\alpha, \quad (142.4)$$

J — от

$O; l$ —

M и

$$\sin \alpha \approx \alpha. \quad (142.4)$$

$$J\ddot{\alpha} + mgl\alpha = 0, \text{ или } \ddot{\alpha} + \frac{mgl}{J}\alpha = 0.$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{mgl}{J}}, \quad (142.5)$$

$$\ddot{\alpha} + \omega_0^2 \alpha = 0,$$

$$(142.1),$$

[(140.1)]

$$\alpha = \alpha_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \mathbf{L} \quad (142.6)$$

$$(142.6)$$

$$J = ml^2, \quad (142.8)$$

/ —

ω_0 [.

$$(142.8)$$

$$(142.7),$$

(142.5)]

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}, \quad (142.7)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \quad (142.9)$$

$$L = \frac{J}{ml} \text{ —}$$

зического O'

$$(142.7) \quad (142.9),$$

L
/

$L,$

(. . . 203).

(16.1), получим

$$L = \frac{J}{ml} = \frac{J_C + ml^2}{ml} = l + \frac{J_C}{ml} > l,$$

. . OO'

§ 143.

3.

полей.

длинной нити.

$L,$

И $W = \frac{Q^2}{2C} + \frac{L\dot{Q}^2}{2} = \text{const},$

$(R \approx 0).$

$t = \dots$

$\pm Q$

$t = 0$

(. 204,)

(. 204,).

$\frac{Q^2}{2C} [\dots (95.4)].$

$\frac{LQ^2}{2}$

$R \approx 0,$

(. 204,).

(. 204, z) и

$t = \dots$

(. 204, a).

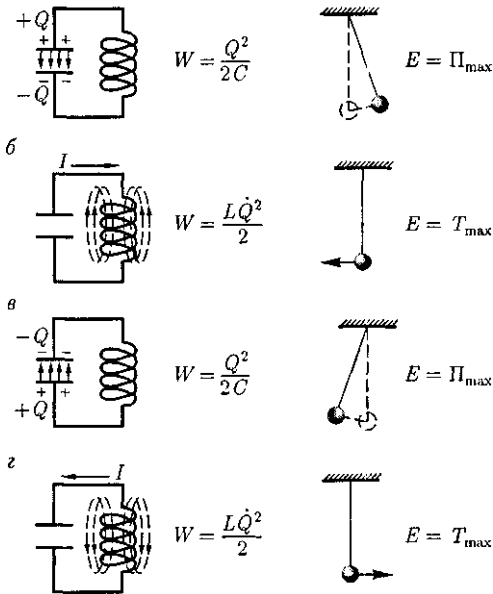


Рис. 204

Q
 U

энергий

(. 204),

(143.2)

элек-
($\frac{Q^2}{LC}$)

$$\ddot{Q} + \frac{1}{LC} Q = 0.$$

(142.1) (140.1)

($\frac{1}{2} L \dot{Q}^2$) — кинетическая

Q

L

$$Q = Q_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (143.3)$$

Q_m —

ω_0 ,

L ,

R ,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (143.4)$$

$$IR + U_C = \mathcal{E}_s,$$

и

IR —

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (143.5)$$

$U_C = \frac{Q}{C}$ —

(143.5)

ре; $\mathcal{E}_s = -L \ddot{Q}$ —

[(140.4)]

ственная (\mathcal{E}_s — един-

$$I = Q = -\omega_0 Q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) =$$

$$= I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right), \quad (143.6)$$

$$I_m = \omega_0 Q_m$$

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{Q}{C} = 0. \quad (143.1)$$

(143.1) L и

$I = Q$ и $\frac{dI}{dt} = \dot{Q}$ дифференци-

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{Q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi) =$$

$$= U_m \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (143.7)$$

$$\ddot{Q} + \frac{R}{L} \dot{Q} + \frac{1}{LC} Q = 0. \quad (143.2)$$

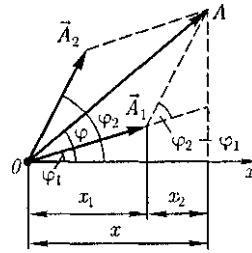
$$U_m = \frac{Q_m}{C}$$

(143.3) (143.6)

§ 140).

$R = 0$,

[(143.7)]



$$\begin{cases} x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1), \\ x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_2), \end{cases}$$

1) $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm 2m\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$),
 $= A_1 + A_2, \dots$
 колебания

2) $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm(2m+1)\pi$ ($m = 0, 1, 2, \dots$),
 $= |A_1 - A_2|, \dots$

(§ 140).

(. 205). A_1
 и A_2 ω_0 , $(\varphi_2 - \varphi_1)$

$$= x_1 + x_2 = A \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (144.1)$$

(144.1) и φ

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1);$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}. \quad (144.2)$$

$\omega + \Delta\omega$, $\Delta\omega \ll \omega$ ω

$$\begin{cases} x_1 = A \cos \omega t, \\ x_2 = A \cos(\omega + \Delta\omega)t. \end{cases}$$

$$\frac{\Delta\omega}{2} \ll \omega,$$

$$x = \left(2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right) \cos \omega t. \quad (144.3)$$

$(\varphi_2 - \varphi_1)$

(144.2)

$(\varphi_2 - \varphi_1):$

(144.3)

ω, A_0

$$A_0 = \left| 2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right| \quad (144.4)$$

(), ...

колебаний:

$$\omega_0 = \Delta\omega. \quad (144.5)$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\Delta\omega}. \quad (144.3)$$

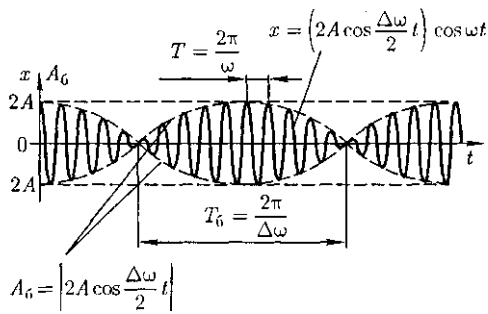
. 206,

(144.3),

$$(144.4)$$

[(§ 158)]

$$s = f(t)$$



. 206

$$s = f(t) = \frac{A_0}{2} + A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t + \varphi_2) + \dots + A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n). \quad (144.5)$$

$$(144.5)$$

$\omega_0, 2\omega_0, 3\omega_0, \dots,$

и . . .

§ 145.

$\omega,$

x и $y.$

$$= A \cos \omega t, \quad (145.1)$$

и B —

$$(145.1)$$

$t.$

¹ . Фурье (1768—1830) —

уче-

$$\frac{x}{A} = \cos \omega t;$$

$$\frac{y}{B} = \cos(\omega t + \alpha) = \cos \omega t \cos \alpha - \sin \omega t \sin \alpha$$

$$\frac{y}{B} = \cos(\omega t + \alpha) = \cos \omega t \cos \alpha - \sin \omega t \sin \alpha$$

$$\frac{x^2}{A^2} - \frac{2xy}{AB} \cos \alpha + \frac{y^2}{B^2} = \sin^2 \alpha. \quad (145.2)$$

$$1) \alpha = 2m \frac{\pi}{2} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$y = \pm \frac{B}{A} x, \quad (145.3)$$

«+»

(. 207,),

«-» —

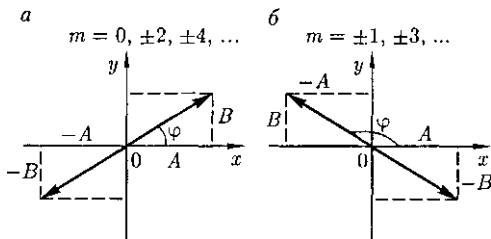
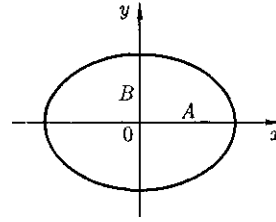


Рис.207



. 208

(. 207,).

$$\omega \sqrt{A^2 + B^2},$$

(145.3)],

$$\varphi = \arctg \left(\frac{B}{A} \cos m\pi \right).$$

линейно

$$2) \alpha = (2m+1) \frac{\pi}{2} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{y^2}{B^2} = 1. \quad (145.4)$$

$$= \dots [\dots (145.4)]$$

циркулярно

Лиссажу¹.

¹ (1822 1880)

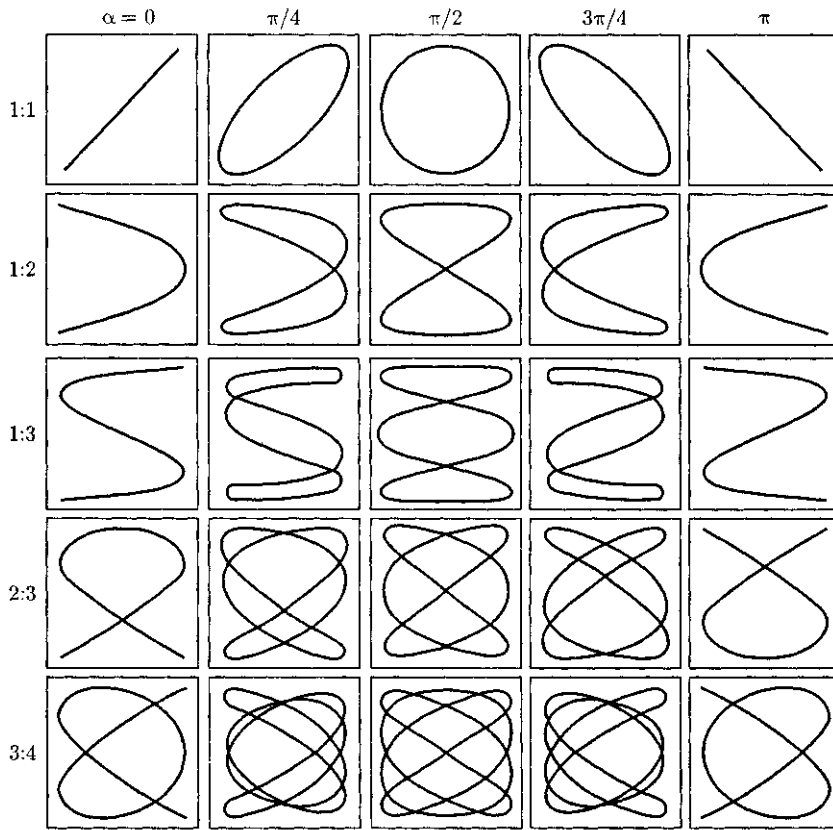


Рис. 209

. 209 представлены соотношений

§ 146.

(; α)

колебательных

колебаний

$$\ddot{u} + (\omega_0^2 - \delta^2)u = 0. \quad (146.3)$$

$$\ddot{u} + (\omega_0^2 - \delta^2)u = 0. \quad (146.3)$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2 \quad (146.4)$$

$$[\quad (\omega^2 - \delta^2) > 0,$$

$$(142.1) \quad u + \omega^2 u = 0,$$

$$= A_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad [\quad . (140.1)].$$

$$(146.1)$$

$$(\delta^2 \ll \omega_0^2)$$

$$s = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (146.5)$$

$$A = A_0 e^{-\delta t} \quad (146.6)$$

; A_0 —

$$(146.5)$$

. 210

(146.6) —

ЛИНИЯМИ.

= ,
6

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0, \quad (146.1)$$

s —

; $= \text{const}$ —

, ω_0 —

— 0 (

$$(146.1)$$

$$s = e^{-\delta t} u, \quad (146.2)$$

$$u = u(t).$$

$$(146.2)$$

$$(146.1)$$

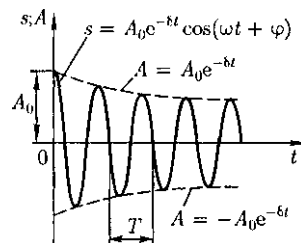


Рис. 210

(146.4)
$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \quad (146.5)$$

$$A(t) = A(t+T) e^{-\delta T}$$

$$\frac{A(t)}{A(t+T)} = e^{\delta T}$$

затухания,

$$\theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e} \quad (146.7)$$

; N_e —

(142.2)]

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x} \quad (146.9)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{см.}]$$

$$\delta = \frac{r}{2m} \quad (146.10)$$

(146.1)

Q

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = 0.$$

(146.1) (146.5)

$$Q = \frac{\pi}{\theta} = \pi N_e = \frac{\pi}{\delta T_0} = \frac{\omega_0}{2\delta} \quad (146.8)$$

($\delta^2 \ll \omega_0^2$),

$$T_0) \quad (146.8)$$

N_e ,

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi),$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{r^2}{4m^2}} \quad (146.4).$$

(146.8) (146.10), $Q = \frac{\sqrt{km}}{r}$.

2.

$$[\dots (143.2)] \quad (R \neq 0)$$

$$\ddot{Q} + \frac{R}{L} \dot{Q} + \frac{1}{LC} Q = 0. \quad (143.4)$$

$$\delta = \frac{R}{2L}, \quad (146.11)$$

$$(143.2)$$

(146.1)

$$\ddot{Q} + 2\delta \dot{Q} + \omega_0^2 Q = 0. \quad (146.1) \quad (146.5)$$

$$Q = Q_m e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (146.12)$$

$$(146.4),$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (146.13)$$

$$\omega_0 [\dots (143.4)]. \quad R = 0$$

$$(146.13) \quad (143.4).$$

и 7

Колебания			
механические		электромагнитные	
Дифференциальное уравнение	$\ddot{x} + \frac{r}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0$ $\ddot{x} + 2\delta \dot{x} + \omega_0^2 x = 0$	Дифференциальное уравнение	$\ddot{Q} + \frac{R}{L} \dot{Q} + \frac{1}{LC} Q = 0$ $\ddot{Q} + 2\delta \dot{Q} + \omega_0^2 Q = 0$
Масса	m	Индуктивность катушки	L
Коэффициент сопротивления	r	Сопротивление	R
Коэффициент жесткости	k	Обратная величина емкости	$\frac{1}{C}$
Смещение	x	Заряд	Q
Скорость	v	Сила тока	I
Потенциальная энергия	$\frac{kx^2}{2}$	Энергия электрического поля конденсатора	$\frac{Q^2}{2C}$
Кинетическая энергия	$\frac{mv^2}{2}$	Энергия магнитного поля катушки	$\frac{LI^2}{2}$
Собственная частота пружинного маятника	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$	Собственная частота колебательного контура	$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
Циклическая частота затухающих колебаний	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{r}{2m}\right)^2}$	Циклическая частота затухающих колебаний	$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$
Коэффициент затухания	$\delta = \frac{r}{2m}$	Коэффициент затухания	$\delta = \frac{R}{2L}$
Добротность пружинного маятника	$Q = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{\sqrt{km}}{r}$	Добротность колебательного контура	$Q = \frac{\omega_0}{2\delta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

(146.7),

[(146.8)]

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (146.14)$$

.7

его

Автоколебательными

6

$$\delta = \omega_0$$

$t \rightarrow$

§ 147.

()

диссипативной

$X(t)$,

$$X(t) = X_0 \cos \omega t.$$

$X(t)$

(§ 147),

$$F = F_0 \cos \omega t. \quad (147.1)$$

(147.1)

(146.9)

$$m\ddot{x} = -kx - r\dot{x} + F_0 \cos \omega t.$$

(142.2) (146.10),

).

$$\ddot{x} + 2\delta\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t. \quad (147.2)$$

, $X(t)$

переменное

$$U = U_m \cos \omega t. \quad (147.3)$$

(147.3) (143.2) учетом

$$\ddot{Q} + \frac{R}{L} \dot{Q} + \frac{1}{LC} Q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t. \quad (143.4) \quad (146.11),$$

$$\ddot{Q} + 2\delta\dot{Q} + \omega_0^2 Q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t. \quad (147.4)$$

соответственно

$$(147.2) \quad (147.4)$$

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = x_0 \cos \omega t, \quad (147.5)$$

$$\left(x_0 \frac{U}{L} \right) \cdot \overline{m}$$

$$(147.5)$$

$$(146.5)$$

(146.1) и

$$(\text{ § 140). \quad (147.5) \quad x_0 e^{i\omega t};$$

$$\ddot{s} + 2\delta\dot{s} + \omega_0^2 s = x_0 e^{i\omega t}. \quad (147.6)$$

$$s = s_0 e^{i\eta t}.$$

$$s \text{ и } (\dot{s} = i\eta s_0 e^{i\eta t}, s = -\eta^2 s_0 e^{i\eta t}) \quad (147.6),$$

$$s_0 e^{i\eta t} (-\eta^2 + 2i\delta\eta + \omega_0^2) = x_0 e^{i\omega t} \quad (147.7)$$

$$, \quad t, \quad | = \quad (147.7)$$

$$s_0 (\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\delta\omega):$$

$$s_0 = \frac{x_0}{(\omega_0^2 - \omega^2) + 2i\delta\omega} =$$

$$= x_0 \frac{(\omega_0^2 - \omega^2) - 2i\delta\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}.$$

$$s_0 = A e^{-i\varphi},$$

$$A = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}}; \quad (147.8)$$

$$\varphi = \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (147.9)$$

(147.6)

вид

$$s = A e^{i(\omega t - \varphi)}.$$

$$(147.5),$$

$$s = A \cos(\omega t - \varphi), \quad (147.10)$$

$$A \text{ и } \varphi \quad (147.8) \quad (147.9).$$

$$(147.5)$$

$$s = \frac{x_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}} \times \cos\left(\omega t - \arctg \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right). \quad (147.11)$$

$$(147.5)$$

$$s_1 = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega_1 t - \varphi_1) \quad (147.12)$$

$$[\text{ (146.5)}] \quad (147.11) \quad (147.12)$$

(

)

,

$$(147.8).$$

на . 211.

,

ω

;

$$(147.8) \quad (147.9),$$

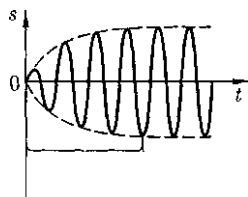
ω .

$$(147.10), (147.8)$$

$$(147.9)$$

$$(143.4)] \text{ и } \delta = \frac{R}{2L} \text{ [см. (146.11)]}: \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

.211



$$Q_m = \frac{U_m}{\omega \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad (147.13)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}.$$

$$Q = Q_m \cos(\omega t - \alpha)$$

по t ,

:

$$I = -\omega Q_m \sin(\omega t - \alpha) =$$

$$= I_m \cos\left(\omega t - \alpha + \frac{\pi}{2}\right), \quad (147.14)$$

$$I_m = \omega Q_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (147.15)$$

$$(147.14)$$

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi),$$

$$\varphi = \alpha - \frac{\pi}{2}$$

$$[\text{ (147.3)}].$$

$$(147.13)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg}\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= -\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (147.16)$$

$$(147.16)$$

$$(\varphi > 0),$$

$$\omega L > \frac{1}{\omega C},$$

$$(\varphi < 0), \text{ если } \omega L < \frac{1}{\omega C}.$$

(147.15) PI (147.16)

(§ 149).

§ 148.

()

ω .

()

(Q) (147.8) ,
()

определить

$\omega_{рез}$ ()

(147.8),

(148.1) (148.2)

8,

[(147.8)] $\rightarrow 0$,

на-

$\frac{\sim m}{r \cdot 2} \cdot \omega \rightarrow 0$,

по ω

$\omega_{рез}$:

$$-4(\omega_0^2 - \omega^2)\omega + 8\delta^2\omega = 0.$$

при $\omega =$,

$$\pm\sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2},$$

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}. \quad (148.1)$$

() ,

()
 $^2 \ll \omega_0^2$ $\omega_{рез}$

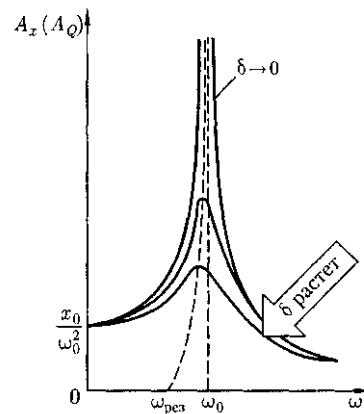
$$\omega_0 \quad (148.1)$$

(147.8),

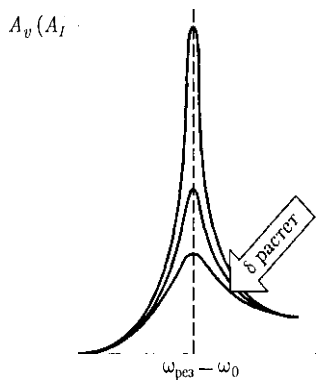
$$A_{рез} = \frac{x_0}{2\delta\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (148.2)$$

. 212 зависимости

8.



.212



.213

$$(148.2) \quad (\delta^2 \ll \omega_0^2)$$

$$A_{\text{рез}} = \frac{x_0}{2\delta\omega_0} = \frac{\omega_0}{2\delta} \frac{x_0}{\omega_0^2} = Q \frac{x_0}{\omega_0^2}$$

Q —

[(146.8)]; — — рассмотрен-

тем

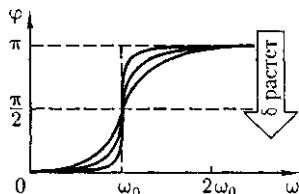
$A_{\text{рез}}$.
.213 представлены

(). ()

$$\omega A = \frac{x_0 \omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2 \omega^2}} =$$

$$= \frac{x_0}{\sqrt{\frac{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}{\omega^2} + 4\delta^2}}$$

.214



$$\omega_{\text{рез}} = \omega_0 \quad \frac{x_0}{\omega_0^2}$$

$$(146.10) \quad (143.4), (146.11), \quad (142.2),$$

$$(A_v)_{\text{max}} = \frac{x_0}{2\delta} = \frac{F_0}{r}$$

$$(A_f)_{\text{max}} = \frac{x_0}{2\delta} = \frac{U_{\text{in}}}{R}$$

$$(147.9) \quad \text{tg } \varphi = \frac{2\delta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad [\text{см.} \\ (8 = 0),$$

() ;

$\varphi \neq 0$.
 $\varphi = \omega$

.214, ,

φ . (147.9) ,
 $\omega = 0 \quad \varphi = 0, \quad \omega = \omega_0$

= —, . . (—)

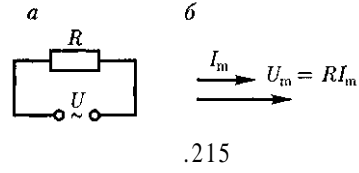
$\omega \gg \omega_0 \quad \varphi \rightarrow \pi$, т. .

()

.214,

не

частоты



.215

1.

$R (L \rightarrow \infty, C \rightarrow 0)$ (рис. 215, а).

§149.

Установившиеся

(рис. § 147)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_m}{R} \cos \omega t = I_m \cos \omega t,$$

$$I_m = \frac{U_m}{R}.$$

значения

мето-

На рис. 215, б

$$\left(\begin{matrix} I_m \\ U_m \end{matrix} \right) = \left(\begin{matrix} U_m \\ U_m \end{matrix} \right).$$

2.

$L (R \rightarrow 0, C \rightarrow 0)$ (рис. 216, а).

$$(149.1),$$

$$[\text{рис. (126.3)}] \mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

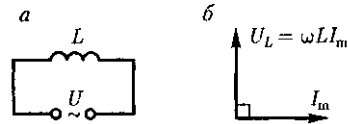
[рис. (100.3)]

$$U_m \cos \omega t - L \frac{dI}{dt} = 0,$$

$$L \frac{dI}{dt} = U_m \cos \omega t. \quad (149.2)$$

$$U = U_m \cos \omega t, \quad (149.1)$$

U_m —



.216

$$U_L = L \frac{dI}{dt} \quad (149.3)$$

(149.2)

$$dI = \frac{U_m}{L} \cos \omega t dt.$$

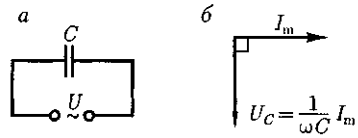


Рис. 217

$L \rightarrow 0$ (рис. 217, а).
(149.1)

(
)

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \sin \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (149.4)$$

$I_m =$

$$R_L = \quad (149.5)$$

(149.5)
($\omega \rightarrow 0$)

$$U_m = \omega L I_m \quad (149.2)$$

(149.3)

$$U_L = \omega L I_m \cos \omega t. \quad (149.6)$$

(149.6)

$$U_L \quad , \quad /,$$

текущих

216, б).

3.

274

, то

$$\frac{Q}{C} = U_C = U_m \cos \omega t.$$

Сила

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\omega C U_m \sin \omega t = I_m \cos \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (149.7)$$

где $I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{1/(\omega C)}$.

$$R_C = \frac{1}{\omega C}$$

(
($\omega = 0$) $R_C = \infty$, . . .

$$U_C = \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t. \quad (149.8)$$

$$(149.8) \quad U_C \quad , \quad I \quad -.$$

(. 217,).

($R \rightarrow 0$,

4.

218,

$R,$
 L и

$$(149.1).$$

U_L и $U_C.$

218,6

(U_L) и $(U_C).$
 U_m

218,

φ

(147.16)]

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (149.9)$$

чаем $(RI_m)^2 + \left[\left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I_m \right]^2 = U_m^2,$

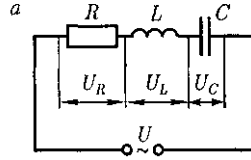
$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}, \quad (149.10)$$

(147.15).

$U =$

$- U_m \cos \omega t,$

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (149.11)$$



б

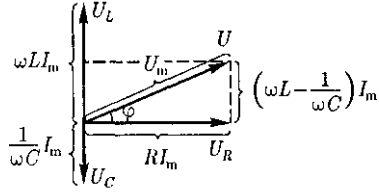


Рис. 218

$$\varphi \quad I_m \quad (149.9) \quad (149.10).$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + (R_L - R_C)^2} \quad (149.12)$$

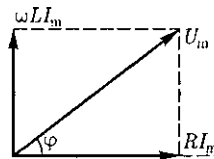
$$X = R_L - R_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

U_L

$U.$

219,

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}; \quad I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (149.13)$$



219

275

(149.9) (149.10)
 (149.13), $\frac{1}{C} = 0$, ...
 $C = 0$.

$(U_R = U)$,
 (U_C) и
 (U_L)
 (150.2) —

(94.3)].

на рис. 220,
 ω
 . 213.

§ 150.

$$(U_L)_{\text{м рсз}} = (U_C)_{\text{м рсз}}$$

(. . . 218),

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (150.1)$$

(149.9) φ $(\varphi = 0)$,
 (150.1)

$$(U_L)_{\text{м рсз}} = (U_C)_{\text{м рсз}} = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m =$$

$$= \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} U_m = Q U_m,$$

(146.14).

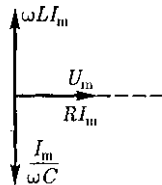
$$\omega_{\text{рсз}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (150.2)$$

Z (149.12)

R

(U_m)
 напряже-

Рис. 220



$(Q_B$ — $Q U_m$)
 U_m .

волны.

учитывать

§ 151.

C и L (рис. 221).

допустим, что

$$U = U_m \cos \omega t \quad (149.1),$$

$$I_1 = I_{m1} \cos(\omega t - \varphi_1),$$

$$(149.10) \quad R = 0$$

$L = 0$:

$$I_{m1} = \frac{U_m}{1/(\omega C)}$$

$$(149.9) \quad \varphi_1$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = -\infty,$$

$$\varphi_1 = \left(2n + \frac{3}{2}\right)\pi, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots \quad (151.1)$$

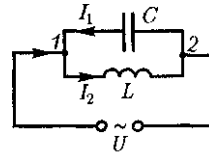
$1L2$

$$I_2 = I_{m2} \cos(\omega t - \varphi_2),$$

$$(149.10) \quad R = 0 \quad = \infty$$

§ 149):

.221



$$I_{m2} = \frac{U_m}{\omega L}$$

(149.9)]

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = +\infty, \quad (151.2)$$

$$\varphi_2 = \left(2n + \frac{1}{2}\right)\pi, \text{ где } n = 1, 2, 3, \dots$$

(151.1)

(151.2)

$$1C2 \quad 1L2 \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \pi,$$

(неразветвленной)

$$I_m = |I_{m1} - I_{m2}| = U_m \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right|.$$

Если $\omega = \omega_{\text{рез}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то $I_{m1} = I_{m2}$
 $I_m = 0$.

цепи,

ω

$\omega_{\text{рез}}$

(§ 150).
 I_m

R ,

$\varphi_1 - \varphi_2$

π ,

I_m

I_1 и I_2

$$\langle \cos^2 \omega t \rangle = \frac{1}{2},$$

$$\langle \sin \omega t \cos \omega t \rangle = 0, \text{ получим}$$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_m U_m \cos \varphi. \quad (152.1)$$

$$218) \quad U_m \cos \varphi = R I_m.$$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} R I_m^2.$$

ток $I = \dots$

(§ 125).

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

§ 152.

$$(152.1)$$

$$\langle P \rangle = IU \cos \varphi, \quad (152.2)$$

$\cos \varphi$

$$(152.2)$$

значений

$$P(t) = U(t)I(t),$$

$$U(t) = U_m \cos \omega t, \quad I(t) = I_m \cos(\omega t - \varphi)$$

[(149.1) (149.11)].

$$\cos(\omega t - \varphi),$$

$$P(t) = I_m U_m \cos(\omega t - \varphi) \cos \omega t =$$

$$= I_m U_m (\cos^2 \omega t \cos \varphi + \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi).$$

$$\cos \varphi = 1 \quad = UI.$$

$$(R = 0), \quad \cos \varphi = 0$$

$\cos \varphi$

$$x = 0,037 \cos\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{8}\right), \text{ м}$$

18.8.

гармонических

$$= \cos \pi t \text{ и}$$

$y = \cos \frac{\pi}{2}t$. Определите
 $[2y^2 - x = 1]$

18.9.

100 колебаний,
 [286]

18.10.

25 мГц,

$$Q_m - 1$$

; 1) ; 2) ; 3)
 [1] 3,14 ; 2) 0,06; 3) $U = 100 e^{-20t} \cos 636\pi t$,]

18.11.

110 .

0,5 .

18.12.

[60°]

50

50

10^{-2} ,

3000 .

60°. [4,1]

18.13.

32

120 ,

1 .

5 .

[119 |
 18.14.

5

2 .

1

0,1 .

[100]

19

УПРУГИЕ ВОЛНЫ

§ 153.

(волной).

. 222

вДОЛЬ

ξ

t .

$\xi(x,t)$

и

(. 202).

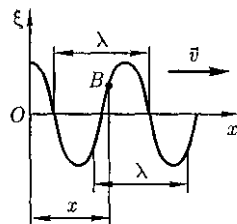
(. 222).

$$\lambda = vT,$$

$$= \frac{1}{\nu},$$

$$v = \lambda \nu.$$

Рис. 222



является $\xi = \xi(x, t)$.

колебаний

$$\xi(0, t) = A \cos \omega t, \quad B$$

§ 154.

$$= \frac{x}{v} -$$

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right), \quad (154.1)$$

$\xi(x, t)$

(154.1)

ВОЛН

Н. [(1846 —

1915),

].

$$\xi(x, t) = A \cos \omega \left(t + \frac{x}{v} \right).$$

ВОЛНЫ.

$$\xi(x, t) = A \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right], \quad (154.2)$$

— const — ; ω —

; φ_0 —

x

t ;

(. . 222).

$$\left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right] -$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}. \quad (154.3)$$

$$(154.3), \quad (154.2)$$

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0). \quad (154.4)$$

$$(154.4)$$

(140.7),

$$\xi(x, t) = Ae^{i(\omega t - kx + \varphi_0)},$$

(§ 140).

$$\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 = \text{const}. \quad (154.5)$$

$$(154.5)$$

$$\omega, \quad dt - dx = 0,$$

$$\frac{dx}{dt} = v. \quad (154.6)$$

$$(154.6)$$

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0), \quad (154.7)$$

рассматриваемой

расстоянием
(154.7)

$$(154.3)$$

$$v = \frac{\omega}{k}. \quad (154.8)$$

ВОЛН

ИЛИ

$$\Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \quad (154.9)$$

$$+ \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = 0. \quad (154.9)$$

$$(154.9)$$

(154.2)
(154.7)].

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}. \quad (154.10)$$

§ 155.

$$A = \left| 2A_0 \cos \frac{t d\omega - x dk}{2} \right|$$

И t .

ВОЛНЫ (

f) :

$$t d\omega - x dk = \text{const},$$

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{d\omega}{dk}. \quad (155.1)$$

[(144.5)].

(155.1)

ВОЛНОВОЙ

$$u = \frac{d\omega}{dk} \quad [\text{ (155.1)}] \quad v = \frac{\omega}{k}$$

[см. (154.8)]

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [\text{ (154.3)}],$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(vk)}{dk} = v + k \frac{dv}{dk} = \\ &= v + k \left(\frac{dv}{d\lambda} : \frac{dk}{d\lambda} \right) = v + k \left[\frac{dv}{d\lambda} : \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \right] = \\ &= v + k \left(-\frac{\lambda^2}{2\pi} \right) \frac{dv}{d\lambda}, \end{aligned}$$

ИЛИ

$$u = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}. \quad (155.2)$$

$$\begin{aligned} & d\omega \ll \omega \quad dk \ll k. \\ \xi &= A_0 \cos(\omega t - x/k) + \\ & + A_0 \cos[(\omega + d\omega)t - (k + dk)x] = \\ & = 2A_0 \cos \left[\frac{t d\omega - x dk}{2} \right] \cos(\omega t - kx). \end{aligned}$$

(155.2)

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

$$\frac{dv}{dt} = 0$$

(154.7),

(154.7),

$$\xi_1 = \frac{A_0}{r_1} \cos(\omega t - kr_1 + \varphi_1);$$

$$\xi_2 = \frac{A_0}{r_2} \cos(\omega t - kr_2 + \varphi_2),$$

r_1 и r_2 —

B ; —

; φ_1 φ_2 —

§ 156.

ВОЛН.

(144.2)

$$A_1 = A_0^2 \left\{ \frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{2}{r_1 r_2} \cos[k(r_1 - r_2) - (\varphi_1 - \varphi_2)] \right\}.$$

= const,

$$= r_1 - r_2,$$

$$k(r_1 - r_2) - (\varphi_1 - \varphi_2) = \pm 2m\pi$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots), \quad (156.1)$$

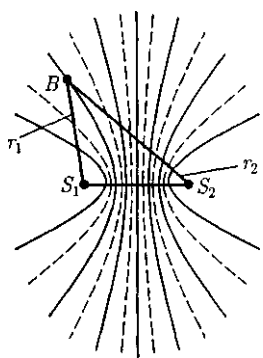
: результирующе-

$$= \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}.$$

$$k(r_1 - r_2) - (\varphi_1 - \varphi_2) = \pm(2m + 1)\pi$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots), \quad (156.2)$$

.223



колебания $A = \left| \frac{A_0}{r_1} - \frac{A_0}{r_2} \right|$, $m = 0, 1, 2, \dots$

$$(156.1) \quad (156.2)$$

, что

$$r_1 - r_2 = \text{const.} \quad (156.3)$$

S_1 S_2 .

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 0.$$

(. 223)

(. 223)

§ 157.

, распространяющиеся

, и

$$\begin{cases} \xi_1 = A \cos(\omega t - kx), \\ \xi_2 = A \cos(\omega t + kx). \end{cases} \quad (157.1)$$

— [(154.3)], получим

нение

$$\begin{aligned} \xi &= \xi_1 + \xi_2 = 2A \cos kx \cos \omega t = \\ &= 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t. \end{aligned} \quad (157.2)$$

$$(157.2)$$

ω $A_{\text{ст}}$ —
 $= \left| 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \right|$, зависящей
 рассматриваемой
 среды, где

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm m\pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (157.3)$$

колебаний

2 .

$$\frac{2\pi x}{\lambda} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (157.4)$$

$$(A_{\text{ст}} - 2A),$$

$$(A_{\text{ст}} - 0),$$

$$(157.3) \quad (157.4)$$

уравнения

$$x_{\text{п}} = \pm m \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots); \quad (157.5)$$

$$x_{\text{узл}} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (157.6)$$

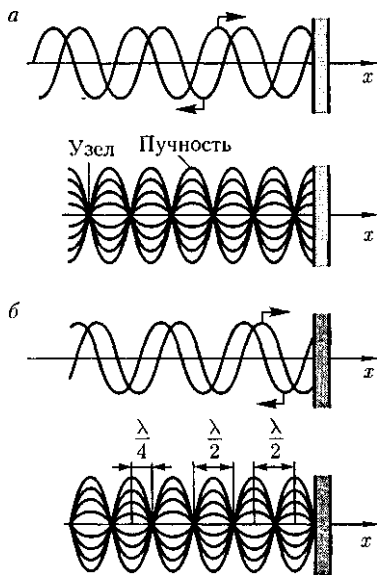
(157.5) (157.6)

которой
амплитудой,
гущей
рассматриваемой

$$[\quad] \quad (157.1)$$

(157.2)

$$2A \cos \frac{\pi x}{\lambda}$$



. 224

§ 158.



Рис. 225

()
16 —
20 000 .

$\nu < 16$ {) и $\nu > 20$, . На . 225
СЛЫШИМОС-

() .

() .

)

Фехнера,

$$I = \frac{W}{St}$$

Единица

СИ —
(/ ²).

I_0 —

$$L = \lg \frac{I}{I_0}$$

10^{-12} / ².

L

и

() .
10
(дБ).

) и ()
) ИНТЕНСИВНОСТИ

1000 () .
) 1 ,

1 . ,
 ≈90 ,
 ≈20 .

1 м—

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (158.1)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ —

, . . . ; R —
 (; —
) (; —
 (158.1) ,

). , .

— , . , =
 = 273 . (M =
 — 29 • 10⁻³ /) v = 331 / ,
 , . . . (M = 2 • 10⁻³ /) v = 1260 / .
 (158.1)

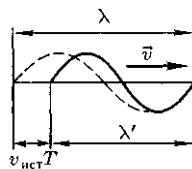
, . . .
 , . . .

, . . .
 (, , . . .
) .

, . . . (

, . . . имеет —

, . . .
 , СВОЙСТВ ,
 . « »



60

0,5—1,5

§ 159.

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{vT} = \nu_0.$$

ν_0 , которой

2.

$v_{ист} = 0$, $\dots v_{пр} > 0$,

$v + v_{пр}$

$$\nu = \frac{v + v_{пр}}{\lambda} = \frac{v + v_{пр}}{vT} = \frac{(v + v_{пр})\nu_0}{v}$$

3.

$v_{ист} > 0$, $\dots v_{пр} = 0$,

1.

$\dots v_{ист} = v_{пр} = 0$.

v —

сре-

$\lambda = vT$ — Рас-

vT () \)

$v_{ист} T$ (. 226), . .

¹Х.Доплер (1803—1853)—австрийский математик

$$\lambda' = \lambda - v_{ист} T = (v - v_{ист}) T.$$

$$\nu = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{(v - v_{\text{ист}})T} = \frac{v\nu_0}{v - v_{\text{ист}}},$$

2 и 3, $v_{\text{ист}} < 0$ (§ 91 —)

3, 4, титанат)

$$\nu = \frac{(v \pm v_{\text{пр}})\nu_0}{v \mp v_{\text{ист}}}, \quad (159.1)$$

П. Ланжевену (1872 — 1946).

$v_{\text{пр}}$ и $v_{\text{ист}}$

ремennое

(159.1)

этой

§ 160.

(§ 158).

$(v > 20)$

ультразвуковой

пия,

(1897—1957).

распространение

между

него

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

- 19.1. x , не $v = 12$ / .
 , находящиеся $x_1 = 7$, $x_2 = 12$
 $\Delta\varphi = -$. $= G$.
 : 1) X; 2) ; 3) ξ_2
 $t = 3$ с. [1] 12 см; 2) $\xi(x, t) = 0,06 \cos\left(2\pi t - \frac{\pi}{6}x\right)$, м; 3) 6 см]
- 19.2. 1000 . 2 на 4
 340 / , ,
 . [0,34]
- 19.3. ,
 ,
 1700 , ,
 10 . [340 /]
- 19.4. 461 / .
- [315 /]
 19.5. 54 / $\Delta\nu = 54$.
 340 / , . [611]

20

§ 161.

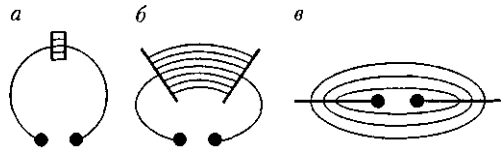
§ 139).

1865 .

. Как

()

(1888),



. 227

поле

(. 227, ,),

f),

(. 227,).

3

227,),

(.

257,),

(.

$X = 6 - 4$.

1923 .
ЭДС, . . Глаголевой-Аркадьевой (1884 — 1945)

() (. 228).

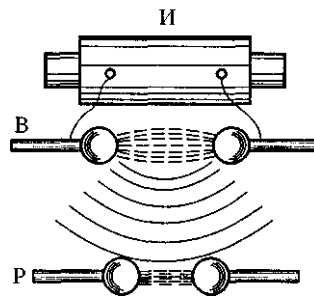


Рис. 228

Таблица 8

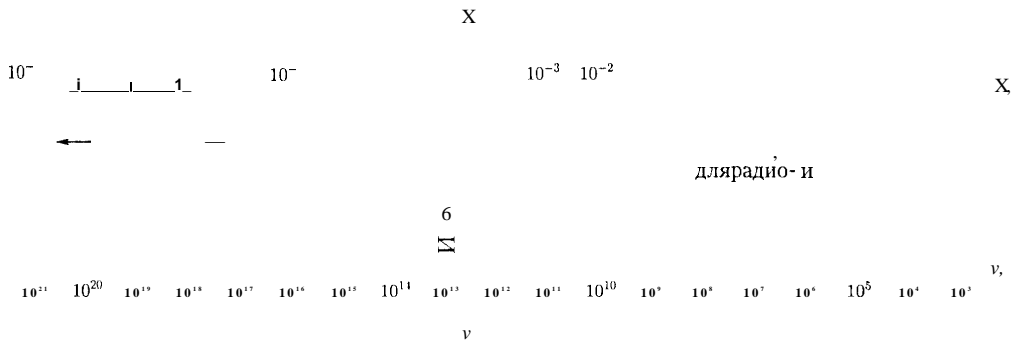


Таблица 9

Вид излучения	Длина волны, м	Частота волны, Гц	Некоторые возможные источники излучения
Радиоволны	$10^3 - 10^{-4}$	$3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{12}$	Колебательный контур Вибратор Герца Массовый излучатель Ламповый генератор
Световые волны: инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-5} - 7,8 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{13} - 3,8 \cdot 10^{14}$	Лампы
видимый свет	$7,8 \cdot 10^{-7} - 3,9 \cdot 10^{-7}$	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$	Лазеры
ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$	
Рентгеновское излучение	$10^{-8} - 6 \cdot 10^{-14}$	$3 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{21}$	Трубки Рентгена
Гамма-излучение	$< 10^{-11}$	$> 3 \cdot 10^{18}$	Радиоактивный распад Ядерные процессы Космические процессы

являлось то, что

X 50 80 . Тсм

(. § 146),

20

XX .

()
 синусоидальной

(или
 \ ---, ---)

γ-излучения.

. 8 9

§ 162.

(§ 161),

(§ 139)

(154.9):

$$\Delta \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \quad (162.1)$$

$$\Delta \vec{H} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}, \quad (162.2)$$

где $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор
 ; v —

(162.1) и (162.2),

электромагнитные поля действительно

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}, \quad (162.3)$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$; ϵ_0 и μ_0 — соответственно

; ϵ — μ —

(— 1 μ — 1)

волн $\epsilon \mu > 1$, с.

странения, вакуумс.

(162.3)

и μ

(162.3)

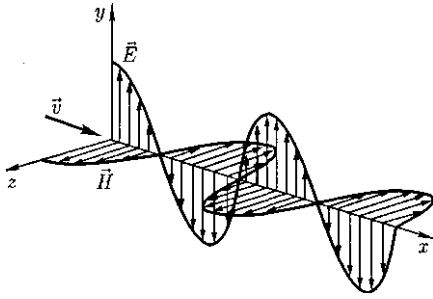
волны.

волн: \vec{H} напряженностей

(рис. 229

« »)

v



. 229

, H \vec{v}

(. . 229),
 E и

связаны

$$\sqrt{\epsilon_0 \epsilon} E = \sqrt{\mu_0 \mu} H. \quad (162.4)$$

(162.1) (162.2)

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2}; \quad (162.5)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}, \quad (162.6)$$

(162.5) (162.6)

(
)

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi); \quad (162.7)$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx + \varphi), \quad (162.8)$$

E_0 и H_0 —
напряженностей

; ω —

; φ —

$$= 0. \quad (162.7) \quad (162.8) \varphi$$

§ 163.

w

$w_{\text{эл}}$ [. (95.8)] $w_{\text{м}}$
[. (130.3)] :

$$w = w_{\text{эл}} + w_{\text{м}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}. \quad (162.4)$$

$w_{\text{эл}} = w_{\text{м}}$

$$w = 2w_{\text{эл}} = \epsilon_0 \epsilon E^2 = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\epsilon \mu} EH.$$

[. (162.3)],

$$S = wv = EH.$$

\vec{E}

[]

—Пойнтинга:

$$\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}].$$

S

времени по

$$\vec{p} = \vec{p}_0 \cos \omega t,$$

p_0 —

p .

(\dots),

+Q и

Q

ω

5
эксперимен-

1899 .

1910 . —

ВОЛНЫ.

$r,$

($r \gg \lambda$), —

W,

$$p = \frac{W}{c}.$$

≤ X.

.7 1895 .

(1859—1906)

$$\cos(\omega t - kr),$$

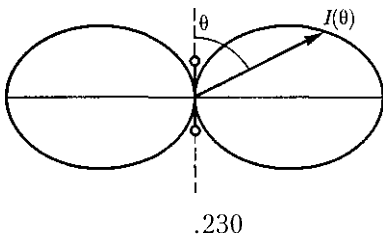
$$\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sim \frac{I(\theta)}{r^2}$$

$$I \sim \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \quad (164.1)$$

$$(164.1) / \theta$$

(164.1)

$$\left(\theta = \frac{\pi}{2}\right) \quad (\theta = 0 \quad \theta = \pi)$$



() . мши . . .

,
,

- ? ?
- волн?
- волн?
- колебательный ?
- ?
- периодически
- ?
- Почему слагаемое $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ в уравнении Максвелла $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$ нужно для по-
и ?
- волн?
- ?
- Умова — Пойнтинга? ?
- ?
- ?

20.1. $\epsilon = 3$ 4 . се .

[31,7]
20.2. , изолированы,
0,5 .

20.3. $\epsilon = 2G,$ $\mu = 1,$
[58,6]
x волны 18,8 / .

[0,47 / ²]

Глава 21

ЭЛЕКТРОННОЙ ОПТИКИ

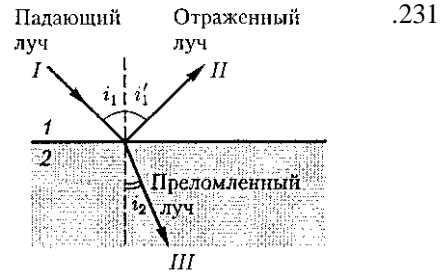
§ 165.

света;

пучком,

(
),
;
(
);
(
 I (рис. 231)
 II
 III ,

i_1'
;
 i_1 :
 $i_1' = i_1$.



$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21},$ (165.1)

$n_1 (\dots)$
 $n_2 (\dots)$
 $(n_1 > n_2),$
 (165.4),

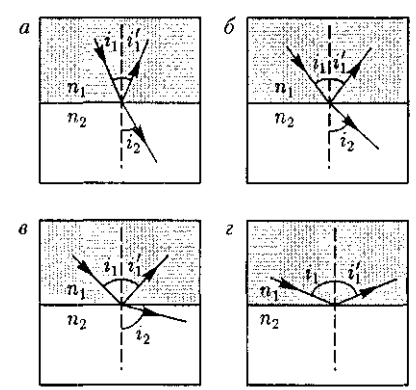
$n_{21} —$
 f
 (i_1, i_1', i_2)
 показатель
 $n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$ (165.2)

$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{n_1}{n_2} > 1.$
 $(\dots 232, \dots)$
 $(\dots 232, \dots)$
 $(i_1 - i_{\text{гп}})$
 не
 $i_{\text{гп}}$
 $i_1 > i_{\text{гп}}$
 $(\dots 232, \dots)$

v
 $n = \frac{c}{v}.$ (165.3)
 $(165.3) (162.3)$
 $= \sqrt{\epsilon\mu},$ ϵ μ

$i_1 = i_{\text{гп}}$
 $i_{\text{гп}}$

(165.1)
 $(165.2),$
 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$ (165.4)
 (165.4)



III (см. . 231),
 $i_2,$
 $i_1, T.$

. 232

$$(165.4) \quad i_{\text{пр}} = \dots$$

$i_2 = \frac{\pi}{2}$.
Тогда

$$\sin i_{\text{пр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}. \quad (165.5)$$

$$(165.5) \quad i_{\text{пр}} \quad n_2 \leq n_1.$$

в

(. 234).

$\approx 1,5$,

— $i_{\text{пр}} = \arcsin \dots = 42^\circ$.

— $i > 42^\circ$ всегда отражение. . 233, а—

:) ;) 90°;)
В

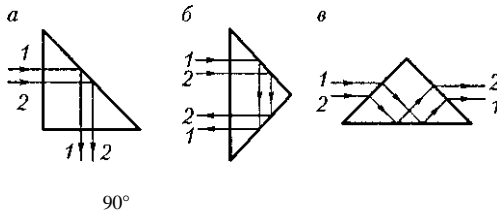


Рис. 233



. 234

$i_{\text{пр}}$

).

(,)

()

()

, падающий

световедущей

, применяются

50

XX

т.д.

§ 166.

ПОМОЩЬЮ ЛИНЗ

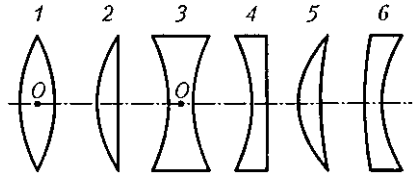


Рис. 235

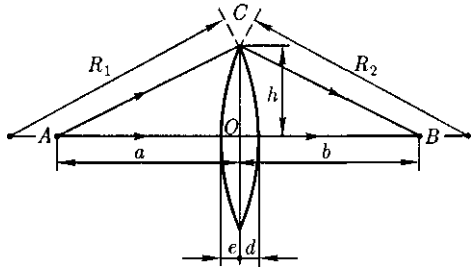


Рис. 236

(рис. 235)
 1) ; 2)
 ; 3) ; 4) плоско-
 ; 5) ; 6)

и

R_1 R_2 и

тонкой

$\frac{1}{f}$

(рис.

236) —
 (),
 линзы (), —

(
 двояковыпуклой

1 (1601—1665) —

$$t_1 = \frac{a + N(e+d) + b}{c},$$

$$N = \frac{\dots}{n_1} \quad (n \text{ и } n_1 \dots)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{(a+e)^2 + h^2} + \sqrt{(b+d)^2 + h^2}}{c}.$$

Так как $t_1 = t_2$, то

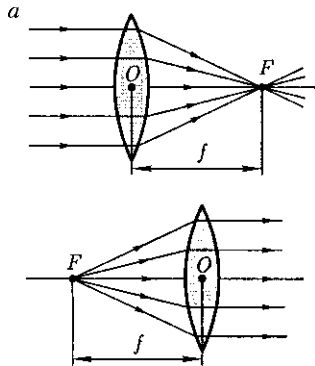
$$a + N(e+d) + b = \sqrt{(a+e)^2 + h^2} + \sqrt{(b+d)^2 + h^2}. \quad (166.1)$$

(при-

$$h \ll (a + \dots), h \ll (b + d)$$

$$\sqrt{(a+e)^2 + h^2} = (a+e) \sqrt{1 + \frac{h^2}{(a+e)^2}} = (a+e) \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a+e} \right)^2 \right] = a+e + \frac{h^2}{2(a+e)}$$

. 237



$$\sqrt{(b+d)^2 + h^2} = b+d + \frac{h^2}{2(b+d)}.$$

(166.1),

$$(N-1)(e+d) = \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{a+e} + \frac{1}{b+d} \right). \quad (166.2)$$

$$e \ll a \text{ и } d \ll b,$$

(166.2)

$$(N-1)(e+d) = \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right).$$

Учитывая, что $e = R_2 - \sqrt{R_2^2 - h^2} = R_2 - R_2 \sqrt{1 - \frac{h^2}{R_2^2}} = R_2 - R_2 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{R_2} \right)^2 \right] = \frac{h^2}{2R_2}$ и соответственно $d = \frac{h^2}{2R_1}$, получим

$$(N-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (166.3)$$

(166.3)

$$\frac{1}{b} = (N-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

$$b = OF = /$$

$$f = \frac{1}{(N-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}.$$

$b \rightarrow \infty, \dots$

оптической силой

().

(. 237,), $= OF = /.$

1 : 1 = 1 м⁻¹.

$F,$

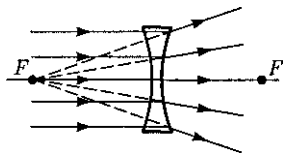
$$(N - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{f} = \Phi \quad (166.4)$$

(. 238).

ца 10

		ПО ЛИНЗЫ	,
	ДВОЙНОМ	ЛИНЗЫ	,
		фокусным линзы	,
		()	
	линзой	линзы, что	увеличенное
		линзы, что	,

.238



(166.4),

(166.3)

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

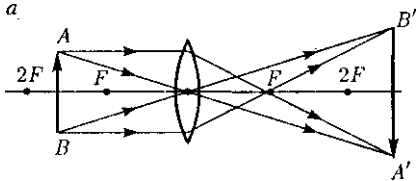
/

1) ,

2) ,

; преломле-

a.



б.

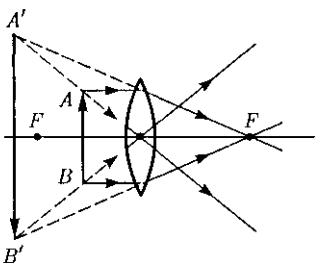
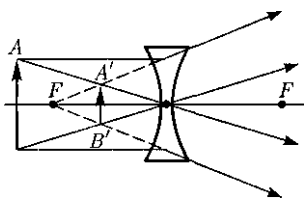


Рис. 239



.240

ШНЯ

(

)

;

3)

(

),

;

оси.

(. 239)

(рис. 240)

(. 239,) и

(. 239,)

. 10

() ,

() .

§ 167.

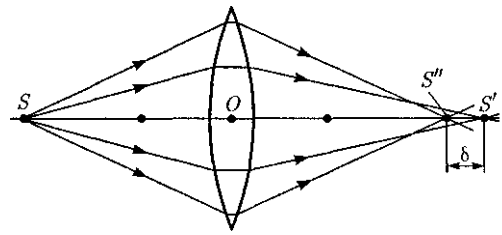
()

(. § 166).

1.

(OS'),
 (. 241).

S'
 S''



.241

$= OS'' - OS'$
 ()

$\delta =$

4.

($\delta < 0$)

($\delta > 0$)

($X = \text{const}$);

2.

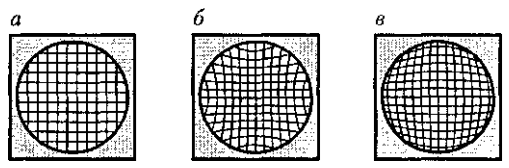
()
)

3.

(—)

242, a) H
 —
 242, —

(. 242,
)



.242

5. Полностью лишь

1) — ;
 2) — ;
 1. $\Phi_e = \frac{W}{t}$;
 $\Phi_e = \frac{W}{t}$;
 ().
 (лучательность) $R_e = \frac{\Phi_e}{S}$;
 $R_e = \frac{\Phi_e}{S}$;
 Единица на (/ ²).
) I_e —

§168.

$I_e = \frac{\Phi_e}{\omega}$;
 $I_e = \frac{\Phi_e}{\omega}$.

(Вт/ср). — пию (

) B_e — , f) . —

ΔI_e (): 1 лм — , —

AS , (1 1 ср

: () (1 = 1 •).

$$B_e = \frac{\Delta I_e}{\Delta S}.$$

$$R = \frac{\Phi}{S}.$$

[Вт/(ср · 2)].

() E_e ,

B_φ (/ 2).

φ

S

(/ 2).

2.

$$B_\varphi = \frac{I}{S \cos \varphi}.$$

(/ 2).

(,) .

—

S

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

тивных,

освещенности — ():

1 —

1 (1 = 1 / 2).

(),

(.) .

§ 169.

Φ

оптический преобразователь.

1.

качестве

поля.

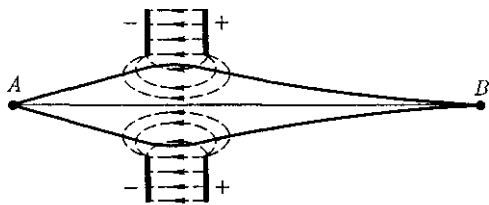
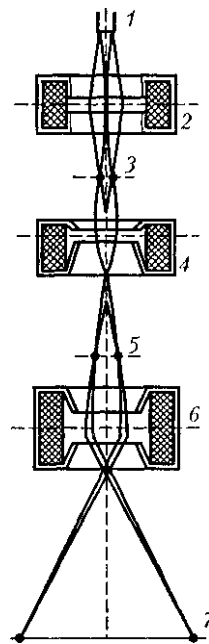


Рис. 243



2. — ;
 (30 — 100 кэВ) ()
 0,1 ()
 На . 244

конден-
 сорной 2,
 3
 нем ,
 4—и
 5.
 6
 7.

(10^6),
 детали
 0,1 нм.
 3.

() , — . 245.
 1) ()
 0,01 — 0,0001
 (0,2 — 0,3).

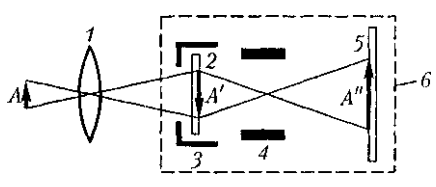


Рис. 245

21.2.

б дптр.

1,6 [10]

21.3.

300 ,

35°,

15 / .

50 .

$$\Phi_0 = 4\pi I. [2,42]$$

22

§ 170.

(430 . . .)

(350 . . .)

i_1

i_2 :

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{v}{c} = n, \quad (170.1)$$

(XIII .),
(XVI .),

(XVII .),

v —

; —

, $v >$, . . .

XVII .

(P. X. (PL . . .))

(. . .),
(. . .),

свойствами —

ПЛОТ-

ИМ

ABC и ADC вытекает

$$\sin i_1' = \sin i_1$$

$$\sin i_1' = \sin i_1$$

$$\sin i_1' = \sin i_1$$

$$v \Delta t = c \Delta t$$

$$BC \text{ равно } At = c \Delta t$$

t.

AD = vAt. Положение волны

DC

///. . 247

$$AC = \frac{BC}{\sin i_1} = \frac{AD}{\sin i_2}, \text{ т.е. } \frac{c \Delta t}{\sin i_1} = \frac{v \Delta t}{\sin i_2}, \text{ откуда}$$

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{c}{v} = n. \quad (170.2)$$

$$(170.2)$$

$$(170.1),$$

At —

AD

vAt =

=

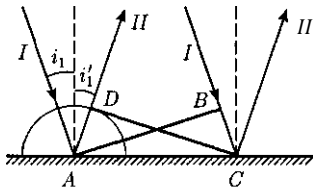
, v < , . .

DC,

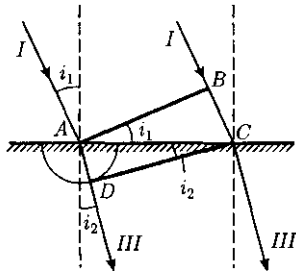
волны — ///.

XVIII

Рис. 246



. 247



XVIII

1851 ..

$$(170.2).$$

XIX

, ϵ и μ — , не
 ,
 ()
 ,
 (1788—1827),)
XIX . . ,
 ,
 ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ
 ,
 ,
 ,
 — — элек-
 Лоренца,
 ,
 , « »
 «
 » () «
 » ()).
 ,
 , КОМПТОНОВСКОГО . .
 ,
 ,
 70 XIX . ,

(§ 139).

[(162.3)],

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} = n,$$

с и v —

(1900)
 М. Планка (1858—1947),

, т. .
 ϵ , f),
 :
 магнитные , $\epsilon_0 = h\nu$, (170.3)
 h — Планка.

1905

его
—*фотонов*,
(170.3).

) — { (($\approx 10^{-8}$).

корпускулярно-волновой
(170.3)

— — () .

§ 171.

$\approx 10^{-8}$

(. § 156).

$\Delta\omega$

$\tau_{\text{ког}}$

$l_{\text{ког}}$

$$8 \cdot 10^{14} \tau_{\text{ког}} \approx 10^{-14}$$

$$4 \cdot 10^{14}$$

$$\approx 10^8 \tau_{\text{ког}} \approx 10^{-8}$$

$$\approx 10^2$$

ког

$\tau_{\text{ког}}$

ВОЛН, ИСХОДЯЩИХ ИЗ

()

$$\tau_{\text{ког}} <$$

$\tau_{\text{ког}}$ —

$\tau_{\text{ког}}$

$$l_{\text{ког}} = c\tau_{\text{ког}}$$

)

(171.1)

§ 172.

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

И колеблются

(§ 162).

(§ 80

110).

$$+ 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) [\dots (144.2)].$$

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

($I \sim A^2$)

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1). (172.1)$$

$$\begin{aligned} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0, & \quad / > I_1 + I_2, \\ \cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0, & \quad / < I_1 + I_2. \end{aligned}$$

$$a \sin \omega \leq \frac{\lambda}{4}, \quad (171.1)$$

); 2ω —

($\varphi_2 - \varphi_1$)

$\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

путем —

ВОЛНЫ

$$I_1 = I_2 + 2I_1 \cos(\Delta)$$

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\delta = \pm 2m\pi$$

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (172.2)$$

$$\delta = \pm 2m\pi,$$

одинаковой
(172.2)

$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (172.3)$$

$$\delta = \pm(2m + 1)\pi,$$

(172.3)

n_1 s_1 —
 n_2 —

s_2
 ωt ,

M первая
 $A_1 \cos \omega t$ —

§ 173.

волна — колебание $A_2 \cos \omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right)$, где

$$v_1 = \frac{c}{n_1}, \quad v_2 = \frac{c}{n_2}$$

$$\delta = \omega \left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} (s_2 n_2 - s_1 n_1) =$$

$$= \frac{2\pi}{\lambda_0} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

когерентности (§ 171).

когерентных

(пригоден)

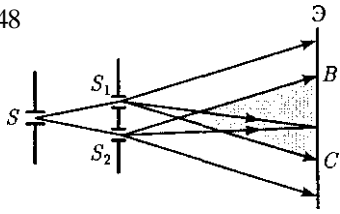
$$\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta \right) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

— $L_2 - L_1$ — L ,
ОПТИЧЕСКИХ

1.

S

. 248

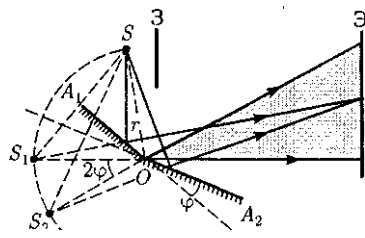


(. 248),

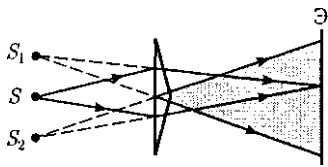
S_1 S_2 , S_1 S_2 S .
 S_1 S_2 , S_1 S_2 ,
 S ,
 S_1 S_2 ,
 S ,
 S_1 S_2 ,
 S_2 .

2.

S (. 249)
 A_1O
 A_2O ,
 180° (φ).



. 249



. 250

S_1 S_2 (2φ)

()

S_1 S_2 (

S).

. 249

()

(3).

3.

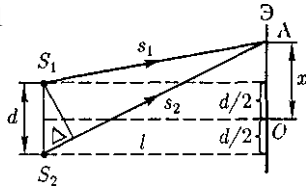
S (рис. 250)

ИЗ МНИМЫХ ИСТОЧНИКОВ S_1 S_2 , ЯВ-

()

(. 251).

d S_1 S_2 (



$l, \quad l \gg d.$
 $O,$
 $= s_2 - s_1$ (§ 172). . 251

$$s_2^2 = l^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2; \quad s_1^2 = l^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2,$$

$$s_2^2 - s_1^2 = 2xd,$$

$$\Delta = s_2 - s_1 = \frac{2xd}{s_1 + s_2}.$$

$l \gg d, \quad s_1 + s_2 \sim$
 $\approx 2l,$
 $\Delta = \frac{xd}{l}. \quad (173.1)$

(173.1) (172.2) (172.3),

$$x_{\max} = \pm m \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots), \quad (173.2)$$

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m=0,1,2,\dots). \quad (173.3)$$

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0, \quad (173.4)$$

Δx
 (\quad) и
 $l, d \lambda_0.$
 $(173.4),$
 $d,$

$d \approx l,$
 $\lambda_0 \approx 10^{-7},$

$l \gg d$
 $(173.4),$
 l, d

$$(173.2) \quad (173.3)$$

$= 0,$
 (\quad)
 $(= 2)$
 $(= 1),$

$(\lambda_0 = \text{const}).$

$0,39$
 $) \quad 0,75$
 $),$

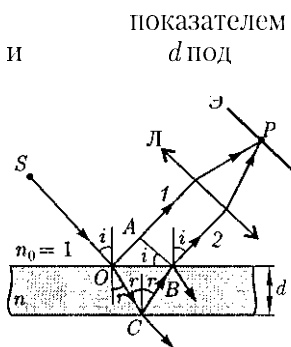
$$(173.4),$$

$m = 0$

§ 174.

происходит

Рис. 252



$$\Delta = n(OC + CB) - OA \pm \frac{\lambda_0}{2},$$

$$OA - OB \sin i = 2d \operatorname{tg} r \sin i.$$

$$\sin i = \sin (n_0 = 1),$$

$$\Delta = 2dn \cos r = 2dn\sqrt{1 - \sin^2 r} = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$$

ПОЛУВОЛНЫ

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2}. \quad (174.1)$$

[(172.2)]

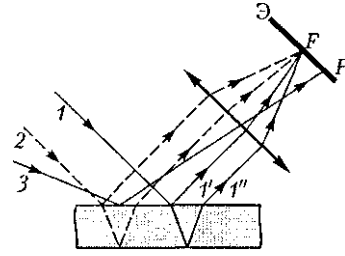
$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = m\lambda_c \quad (174.2)$$

($m = 0, 1, 2, \dots$),

[(172.3)]

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (174.3)$$

($m = 0, 1, 2, \dots$).



вательно, I'' «пересекаются»

I'

наклона

(),

I' и I'' соберут-

линзы (рис. 253

I'

I''),

(рис. 253 — 2),

I ,

интенсивность. Лучи 3,

линзы.

1.

).

(174.2) (174.3)

()
 d , и i .

λ_0 , d и

λ_0 ,

2.

).

(

плоская

I 2 (рис. 254).

падающий I ,
 I'' ,

I'

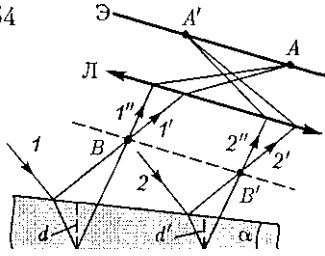
I' и I'' ,

253),

плоскопараллельна.

I' и I''
 A ,

Рис. 254



I' и I''

I' и I''

(174.1), d — толщина клина, $2'$ и $2''$, 2 ,

d' .

толщина

I' и I'' ($2'$ и $2''$)

254

3.

плоскопараллельной
пленки

255).

между

(174.1),

$$\Delta = 2d + \frac{\lambda_0}{2},$$

d — толщина, $R^2 = (R-d)^2 + r^2$, R — радиус кривизны, r — радиус

одинаковый d .

$$d = \frac{r^2}{2R}$$

Следовательно,

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2}. \quad (174.4)$$

(172.2) (174.4) (172.3), m -го

m

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right) \lambda_0 R} \quad (m = 1, 2, 3, \dots)$$

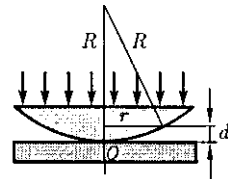


Рис. 255

$$r_m^* = \sqrt{m\lambda_0 R} \quad (m = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

$$\left(\frac{R}{\lambda_0} \right) \approx 4\% \quad (174.2).$$

λ_0 [...] (174.2).

монохромати-

потери

§ 175.

λ_0 .

f

) и

f
высокоотражаю

I' и $2'$ (... 256).
 d и
 n_c и

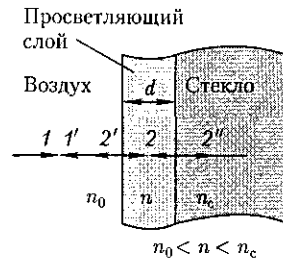


Рис. 256

(172.3)].

$$n = \sqrt{n_c}. \quad (175.1)$$

происходит на поверхностях; минимум (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16) (17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24) (25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32) (33) (34) (35) (36) (37) (38) (39) (40) (41) (42) (43) (44) (45) (46) (47) (48) (49) (50) (51) (52) (53) (54) (55) (56) (57) (58) (59) (60) (61) (62) (63) (64) (65) (66) (67) (68) (69) (70) (71) (72) (73) (74) (75) (76) (77) (78) (79) (80) (81) (82) (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90) (91) (92) (93) (94) (95) (96) (97) (98) (99) (100) (101) (102) (103) (104) (105) (106) (107) (108) (109) (110) (111) (112) (113) (114) (115) (116) (117) (118) (119) (120) (121) (122) (123) (124) (125) (126) (127) (128) (129) (130) (131) (132) (133) (134) (135) (136) (137) (138) (139) (140) (141) (142) (143) (144) (145) (146) (147) (148) (149) (150) (151) (152) (153) (154) (155) (156) (157) (158) (159) (160) (161) (162) (163) (164) (165) (166) (167) (168) (169) (170) (171) (172) (173) (174) (175) (176) (177) (178) (179) (180) (181) (182) (183) (184) (185) (186) (187) (188) (189) (190) (191) (192) (193) (194) (195) (196) (197) (198) (199) (200) (201) (202) (203) (204) (205) (206) (207) (208) (209) (210) (211) (212) (213) (214) (215) (216) (217) (218) (219) (220) (221) (222) (223) (224) (225) (226) (227) (228) (229) (230) (231) (232) (233) (234) (235) (236) (237) (238) (239) (240) (241) (242) (243) (244) (245) (246) (247) (248) (249) (250) (251) (252) (253) (254) (255) (256) (257) (258) (259) (260) (261) (262) (263) (264) (265) (266) (267) (268) (269) (270) (271) (272) (273) (274) (275) (276) (277) (278) (279) (280) (281) (282) (283) (284) (285) (286) (287) (288) (289) (290) (291) (292) (293) (294) (295) (296) (297) (298) (299) (300) (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309) (310) (311) (312) (313) (314) (315) (316) (317) (318) (319) (320) (321) (322) (323) (324) (325) (326) (327) (328) (329) (330) (331) (332) (333) (334) (335) (336) (337) (338) (339) (340) (341) (342) (343) (344) (345) (346) (347) (348) (349) (350) (351) (352) (353) (354) (355) (356) (357) (358) (359) (360) (361) (362) (363) (364) (365) (366) (367) (368) (369) (370) (371) (372) (373) (374) (375) (376) (377) (378) (379) (380) (381) (382) (383) (384) (385) (386) (387) (388) (389) (390) (391) (392) (393) (394) (395) (396) (397) (398) (399) (400) (401) (402) (403) (404) (405) (406) (407) (408) (409) (410) (411) (412) (413) (414) (415) (416) (417) (418) (419) (420) (421) (422) (423) (424) (425) (426) (427) (428) (429) (430) (431) (432) (433) (434) (435) (436) (437) (438) (439) (440) (441) (442) (443) (444) (445) (446) (447) (448) (449) (450) (451) (452) (453) (454) (455) (456) (457) (458) (459) (460) (461) (462) (463) (464) (465) (466) (467) (468) (469) (470) (471) (472) (473) (474) (475) (476) (477) (478) (479) (480) (481) (482) (483) (484) (485) (486) (487) (488) (489) (490) (491) (492) (493) (494) (495) (496) (497) (498) (499) (500) (501) (502) (503) (504) (505) (506) (507) (508) (509) (510) (511) (512) (513) (514) (515) (516) (517) (518) (519) (520) (521) (522) (523) (524) (525) (526) (527) (528) (529) (530) (531) (532) (533) (534) (535) (536) (537) (538) (539) (540) (541) (542) (543) (544) (545) (546) (547) (548) (549) (550) (551) (552) (553) (554) (555) (556) (557) (558) (559) (560) (561) (562) (563) (564) (565) (566) (567) (568) (569) (570) (571) (572) (573) (574) (575) (576) (577) (578) (579) (580) (581) (582) (583) (584) (585) (586) (587) (588) (589) (590) (591) (592) (593) (594) (595) (596) (597) (598) (599) (600) (601) (602) (603) (604) (605) (606) (607) (608) (609) (610) (611) (612) (613) (614) (615) (616) (617) (618) (619) (620) (621) (622) (623) (624) (625) (626) (627) (628) (629) (630) (631) (632) (633) (634) (635) (636) (637) (638) (639) (640) (641) (642) (643) (644) (645) (646) (647) (648) (649) (650) (651) (652) (653) (654) (655) (656) (657) (658) (659) (660) (661) (662) (663) (664) (665) (666) (667) (668) (669) (670) (671) (672) (673) (674) (675) (676) (677) (678) (679) (680) (681) (682) (683) (684) (685) (686) (687) (688) (689) (690) (691) (692) (693) (694) (695) (696) (697) (698) (699) (700) (701) (702) (703) (704) (705) (706) (707) (708) (709) (710) (711) (712) (713) (714) (715) (716) (717) (718) (719) (720) (721) (722) (723) (724) (725) (726) (727) (728) (729) (730) (731) (732) (733) (734) (735) (736) (737) (738) (739) (740) (741) (742) (743) (744) (745) (746) (747) (748) (749) (750) (751) (752) (753) (754) (755) (756) (757) (758) (759) (760) (761) (762) (763) (764) (765) (766) (767) (768) (769) (770) (771) (772) (773) (774) (775) (776) (777) (778) (779) (780) (781) (782) (783) (784) (785) (786) (787) (788) (789) (790) (791) (792) (793) (794) (795) (796) (797) (798) (799) (800) (801) (802) (803) (804) (805) (806) (807) (808) (809) (810) (811) (812) (813) (814) (815) (816) (817) (818) (819) (820) (821) (822) (823) (824) (825) (826) (827) (828) (829) (830) (831) (832) (833) (834) (835) (836) (837) (838) (839) (840) (841) (842) (843) (844) (845) (846) (847) (848) (849) (850) (851) (852) (853) (854) (855) (856) (857) (858) (859) (860) (861) (862) (863) (864) (865) (866) (867) (868) (869) (870) (871) (872) (873) (874) (875) (876) (877) (878) (879) (880) (881) (882) (883) (884) (885) (886) (887) (888) (889) (890) (891) (892) (893) (894) (895) (896) (897) (898) (899) (900) (901) (902) (903) (904) (905) (906) (907) (908) (909) (910) (911) (912) (913) (914) (915) (916) (917) (918) (919) (920) (921) (922) (923) (924) (925) (926) (927) (928) (929) (930) (931) (932) (933) (934) (935) (936) (937) (938) (939) (940) (941) (942) (943) (944) (945) (946) (947) (948) (949) (950) (951) (952) (953) (954) (955) (956) (957) (958) (959) (960) (961) (962) (963) (964) (965) (966) (967) (968) (969) (970) (971) (972) (973) (974) (975) (976) (977) (978) (979) (980) (981) (982) (983) (984) (985) (986) (987) (988) (989) (990) (991) (992) (993) (994) (995) (996) (997) (998) (999) (1000)

$$2nd = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2},$$

$$nd = \frac{\lambda_0}{4}.$$

(175.1)

$$\lambda_0 \approx 0,55$$

отличие

различа-

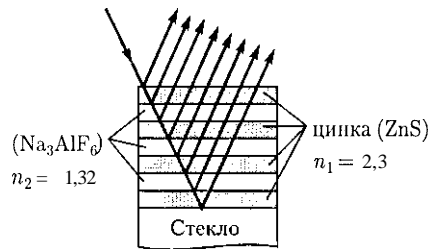
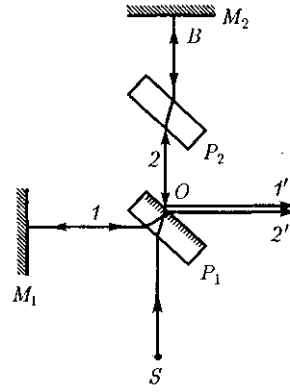


Рис. 257



0,5
 ≈96% (
 ≈3,5% и
 <0,5%).

I' и 2'

M₁ и 2
 M₂.

интерференция.

лучси

поля.

258

45°

P₁,
 S,

(10⁻⁷)

[

: 7 ()
) 2 ()
). I

M₁ (1889—1984)

и,

M₂, P₁ (V). 2

P₁ (2).

P₁

P₂ (

P₁,
).

(,

$$n_x - n_0 = 10^{-6}, \quad X = 0,5, \quad n_x - n_0 = \frac{1}{5}$$

$$l = 10$$

$$= (n_x - n_0)l$$

$$m_0 = \frac{\Delta}{\lambda} = \frac{(n_x - n_0)l}{\lambda}$$

n_0 и n_x ... l ...
 теорий ?
 корпускулярно-волновой
 Планка? ?
 когерентностей?
 $= \frac{3}{2}\lambda$?
 (... 248),
 ? ? ?

- , светлый?
- , ?
- , если ?
- () слои () оптической ?
- () ? высокоотражающих

- 22.1. , s_1 , $s_2 = 1,5$
- 22.2. $n_2 = 1,5$. [2,25] , 0,3 ,
- 22.3. (— 1,5) , (\ =
- = 698). между , 2 . [0,4]
- 22.4. ,
- 1,21 . [1,46]
- 22.5. 1,55 . [1,46]
- длинной 0,55 . показатель ; 2)
- пленка. : 1)
- . [1) 1,24; 2) 0,111]
- 22.6. 450 , 0,135 .
- 22.7. . [0,6]
- 10 .
- 131 .
- 0,59 . [1,000773]

23

§ 176. Гюйгенса—Френеля — ШНЯ

d X ().

l ($l \geq d^2$) .
расстояни-

(§ 170),
точка,

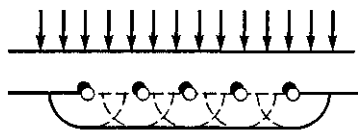
S ,
результат

(. 259).

().

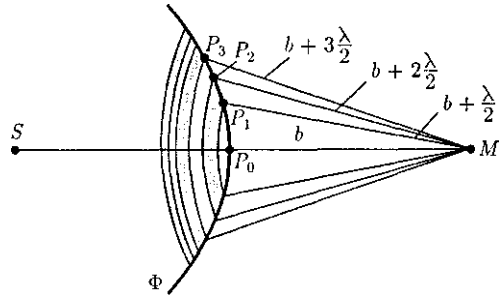
S .

син-



волн.

. 259



260

волн довольно сложный

$$P_1M - P_0M = P_2M - P_1M = P_3M - P_2M = \dots = \frac{\lambda}{2}$$

$$b + \dots, b + 2\dots, b + 3\dots, \dots$$

колебания
M расстояния,
 —, *M* они

§ 177.

$$A = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \quad (177.1)$$

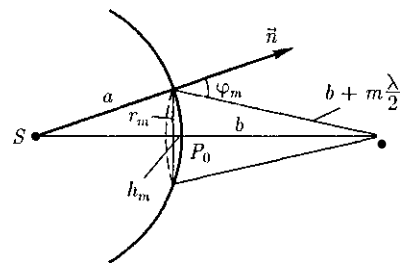
$$A_1, A_2, \dots \quad 1, 2, \dots$$

M ам-

m-й

(. 260).

Φ , являющейся



. 261

$$h_m \quad (261).$$

$$A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > \dots$$

$$\Delta\sigma_m = \sigma_m - \sigma_{m-1} = \frac{2\pi a^2}{\pi ab\lambda} (1 - \dots)$$

$$N = \frac{2\pi a^2}{\pi ab\lambda} (a+b) = 8 \cdot 10^5$$

$$r_m^2 = a^2 - (a - h_m)^2 = \left(b + m \frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b + h_m)^2 \quad (177.2)$$

$$A_m = \frac{A_{m-1} + A_{m+1}}{2} \quad (177.5)$$

$$h_m = \frac{bm\lambda}{2(a+b)} \quad (177.3)$$

$$A = \frac{A_1}{2} + \left(\frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2}\right) + \left(\frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2}\right) + \dots = \frac{A_1}{2} \quad (177.6)$$

$$\sigma_m = 2\pi ah_m = \frac{\pi ab\lambda}{a+b} m \quad (177.4)$$

$$\Delta\sigma_m = \sigma_m - \sigma_{m-1} = \frac{\pi ab\lambda}{a+b} \quad (177.4)$$

зоны.

$$h_m \ll a \quad (177.2)$$

$$r_m^2 = 2ah_m \quad (177.3)$$

261)

φ_m к

(P_0)

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda} \quad (177.7)$$

$$a = 10 \text{ см} \quad X = 0,5$$

$$r_1 = 0,158$$

§ 178.

— Френеля

SM, \dots

(
).

(§ 176),

не

r_m

(177.7)

, и $X(= 0, 2, 4, \dots$

$- 1, 3, 5, \dots$

).

$X,$

$X).$

1.

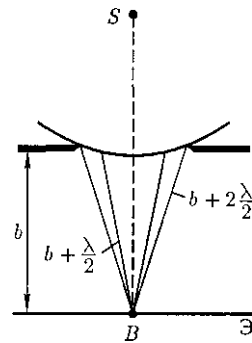
λ

$S,$

$$= A_1 + A_3 + A_5 + \dots$$

(.262).

Рис. 262



Φ

(177.6)], [(177.1)

$$A = \frac{A_i}{2} \pm \frac{A_m}{2},$$

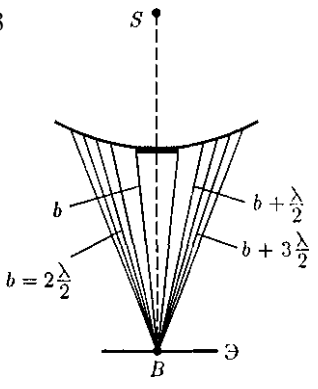
где «+»
«-» —

... () B ()
... ()
... = A_1,
... 2.
§ 177).

(,)
—)
...
... A_m \ll A_1
= —, ...
...
...
... S,
S' (. 263).

чере-

Рис. 263



$$A = A_{m+1} - A_{m+2} + A_{m+3} - \dots =$$

$$= \frac{A_{m+1}}{2} + \left(\frac{A_{m+1}}{2} - A_{m+2} + \frac{A_{m+3}}{2} \right) + \dots$$

ИЛИ

$$A = \frac{A_{m+1}}{2},$$

§ 179.

Фраунгофера¹(

удалены

¹ И. Фраунгофер (1787 1826) —

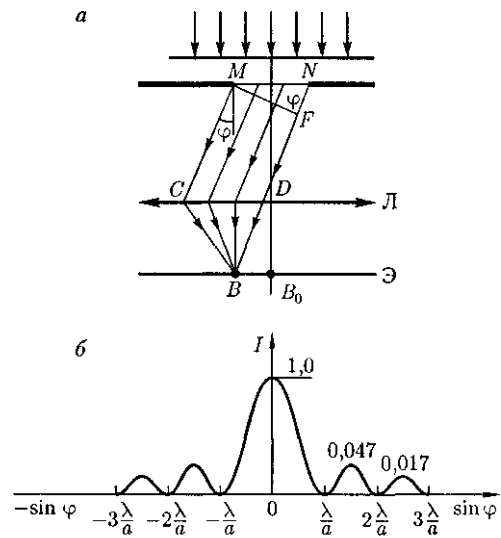


Рис. 264

$$= \pm \frac{(2m+1)\lambda}{2a} \quad \text{интен-}$$

$$), \quad (\quad . 264, \quad .$$

$$1 : 0,047 : 0,017 : 0,0083 : \dots, \dots$$

$$(179.1)$$

$$[\quad (179.2) \\ = \pm \arcsin \dots,$$

];

$$(a > \lambda)$$

$$a \sin \varphi = \pm 2m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (179.2)$$

$\gg X$

$$(\quad),$$

).

$$\text{И } \varphi = \dots$$

$$\sin \varphi = 1$$

$$a \sin \varphi = \pm (2m+1) \frac{\lambda}{2} \quad (m=1, 2, 3, \dots), \quad (179.3)$$

$\ll X$

нескомпенсированной

$$\varphi =$$

$$B_0$$

$$(179.2) \quad (179.3)$$

направления

$$)$$

$$(\sin \varphi_{\min} =$$

$$= \pm \dots)$$

$$(\sin \varphi_{\max} =$$

;

($\varphi = 0$
X).

X.

(= 2)

для
и
($m - 1$),

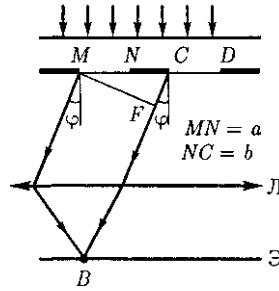


Рис. 265

рванных

. 265

MN

CD.

b,

($d - +$)

§ 180.

— ширины,

φ

$$= CF = (a + b) \sin \varphi = d \sin \varphi. \quad (180.1)$$

не

()

(179.2):

$$a \sin \varphi = \pm m \lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (180.2)$$

лучей —, 3 —, ...,
 емых,
 Ми

$$(180.1)$$

$$d \sin \varphi = \pm (2m + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad (180.2),$$

$$d \sin \varphi = \pm 2m \frac{\lambda}{2} = \pm m \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (180.3)$$

$$d \sin \varphi = \pm \frac{m' \lambda}{N} \quad (m' \neq 0, N, 2N, \dots), \quad (180.4)$$

$$a \sin \varphi = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

$$d \sin \varphi = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots$$

$$d \sin \varphi = 0, \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

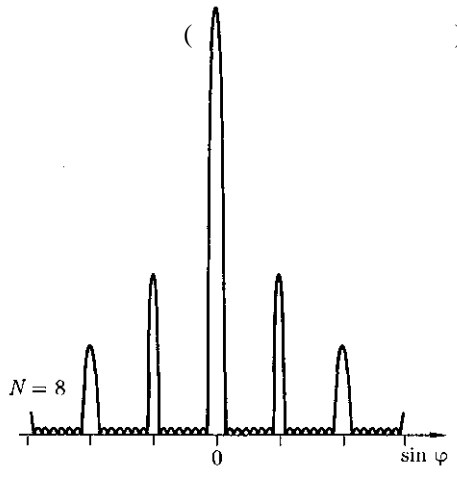


Рис. 266

ис
 (180.3)

$$m \leq \frac{d}{\lambda}$$

\ [. (180.3)].

($m = 0$), , , ()

, — . , ,
(
ИНТЕНСИВНОСТЕЙ
) , . . . (;

, — неоднородностями.
(6000 0,25 / , , ,), , ,
. . . . ,
) . , .

микронеоднородностей,
ностей

§181.

. , ,
(, ,
(), (,
) (,
)

t) — , ,
, ,
(1872—1917) пока-

причиною (1879—1960)] на ,
 () ,
 ,
 ,
 ($\approx 10^{-12} - 10^{-8}$).

(1863—1925) [(1862—1942)
 (1890—1971)].
 ($I \sim \lambda^{-4}$),
 ,
 ,
 ()

(. 267),
 d .

(7, 2)
 0 (

§ 182.

Вульфа—Брэггов

I' и $2'$,

[. (180.3)].

(. § 181),
 10^{-10} ,

($X \approx$

$\approx 5 \cdot 10^{-7}$). [

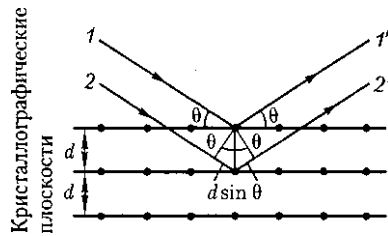


Рис. 267

2.

()

при d и структуре θ и m ,

ОСНОВЕ

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots), \quad (182.1)$$

§ 183.

X,

(,),

спектром,

X,

(182.1).

ИНТЕНСИВНОСТЯМИ

1.

(,),

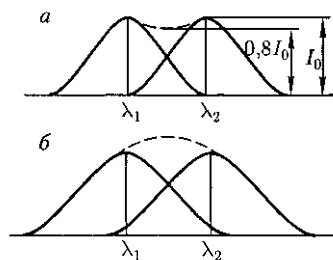
0 ,

()

(d), . . .

ОСНОВЕ **рен-**

— Брэггов



. 268

па

268,).

« 80 % »

$\lambda_1 \lambda_2$.

(. 268, б).

1.

269).

S_1 и S_2 (

$\delta\psi$,

$\delta\psi$

φ , . .

(183.1)

$$\delta\psi = \varphi = \frac{1,22\lambda}{D}$$

(рис. 269).

$$R = \frac{1}{\delta\psi} = \frac{D}{1,22\lambda} \quad (183.2)$$

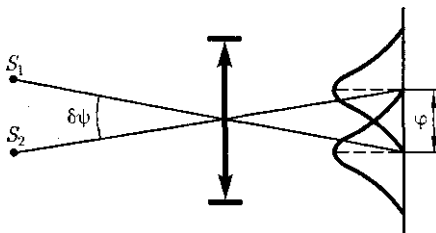
НИМИ

$$\varphi \geq \frac{1,22\lambda}{D}, \quad (183.1)$$

(183.2)

\ — , D —

$$R = \frac{1}{\delta\psi},$$



. 269

ПОМО-

ЛИНЗЫ.

§ 184.

(
),
,
») — (. «
(см. § 169).

ВОЗНИКНОВЕШИЕМ

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}, \quad (183.3)$$

8 —

(1900 1979) 1947 . (1971 .).

2.

m λ_2 1962 . Э.Лейтом 1963 .
(180.3), $d \sin \varphi = m\lambda_2$.

1960 . ВЫСОКОЙ §233). — (.

$$\frac{1}{N} \cdot (180.4)],$$

N —

λ_1 ,

информации

$$d \sin \varphi_{\min} = m\lambda_1 + \frac{\varphi_{\min}}{N} \quad \text{Рэ-}$$

$$\varphi = \varphi_{\min} \dots m\lambda_2 = m\lambda_1 + \frac{\varphi}{N}$$

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} = m, N. \quad \lambda_1 \text{ и } \lambda_2 \quad I \sim \lambda^2, \quad (144.2),$$

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \delta\lambda, \quad (183.3),$$

$K_{\text{диф.реш}} \approx mN$.

, разрешающая

N

предмета

($2 \cdot 10^5$).

ВОЛН.

(. 270,)

рис. 270,

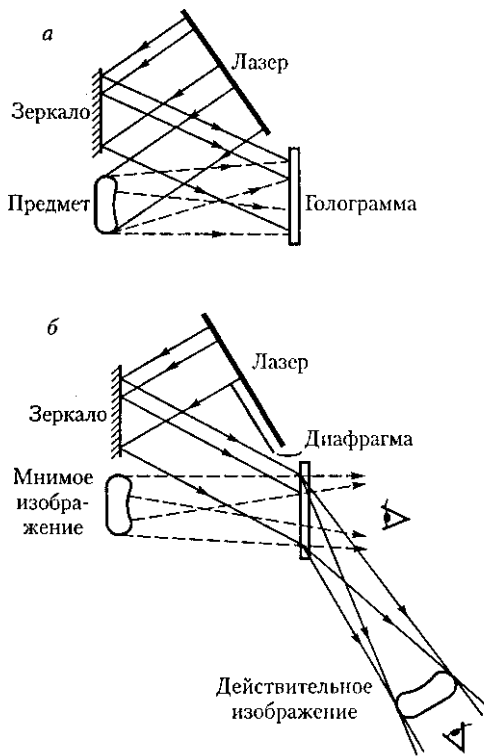


Рис. 270

НО

методы обычной

По

32 32

1024 (

1 мм²), . . .

« »

()

(

логарфический

. . .)

т. д.

• Почему

-
-
-
-
-

— ? ? ? ?

-
-
-

? ? ? ? ?
 Фраунгофера?
 отверстиях ?

-
-

? ; ? ?

-
-

? ? ?

-
-

щели?

-
-

? ? ? ?

на

-
-

? ?

Глава 24

§ 185.

$$(185.2) \quad (185.3)$$

, что

$$\varphi = A(n - 1), \quad (185.4)$$

$$v = - \left(- \right)$$

прелом-

$$(185.4)$$

$$n = f(\lambda). \quad (185.1)$$

(— 1), —
прохождения

(1672).

монохроматический

$$(271) \quad \alpha_1$$

φ .

, что

$$\varphi = (\alpha_1 - \beta_1) + (\alpha_2 - \beta_2) = \alpha_1 + \alpha_2 - A. \quad (185.2)$$

$\alpha_2, \beta_1, \beta_2$ будут A и α_1 ,

$$\frac{\alpha_1}{\beta_1} = n, \frac{\beta_2}{\alpha_2} = \frac{1}{n}, \text{ а так как } \beta_1 + \beta_2 = A, \text{ то}$$

$$\alpha_2 = \beta_2 n = n(A - \beta_1) = n \left(A - \frac{\alpha_1}{n} \right) = nA - \alpha_1, \text{ откуда}$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = nA. \quad (185.3)$$

Рассмотрим

1.

$$[\quad (180.3)],$$

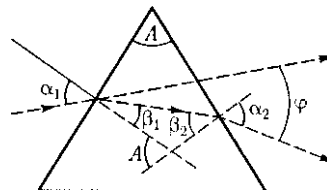


Рис. 271

(185.1).
2.

(180.3)

сильнее,

(. 272).

§ 186.

$$D = \frac{dn}{d\lambda},$$

. 272

$$n = \sqrt{\epsilon\mu},$$

ϵ — ; μ —

$\frac{dn}{d\lambda}$ по

$\mu \approx 1,$

X.

$$n = \sqrt{\epsilon}. \quad (186.1)$$

() —

(186.1) ВЫЯВЛЯЮТСЯ

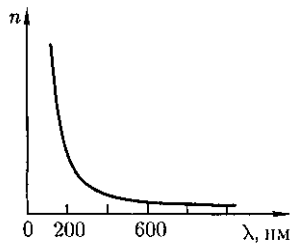
X.

§ 185),

$\sqrt{\epsilon}.$

X

Рис. 272



Лоренца

$$P = n_0 p = n_0 e x. \quad (186.2) \quad (186.3)$$

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e x}{\epsilon_0 E}. \quad (186.4)$$

(88.2)],
 ϵ ω
 [. (88.6)

$$\omega, \dots : = E_0 \cos \omega t.$$

$$\epsilon = 1 + \alpha = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E},$$

(. § 147)

α —
 ; ϵ_0 —
 ; —

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m} \cos \omega t = \frac{e E_0}{m} \cos \omega t, \quad (186.5)$$

$$F_0 = e E_0$$

$$n^2 = 1 + \frac{P}{\epsilon_0 E}, \quad (186.2)$$

$$; \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{m}}$$

ная

$$(186.5),$$

$$\epsilon = n^2 \text{В}$$

$$(\ , \ , \omega_0)$$

ω

$$(186.5)$$

$$(\nu \approx 10^{15}).$$

$$x = A \cos \omega t, \quad (186.6)$$

$$A = \frac{e E_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad (186.7)$$

ДИПОЛЬНЫЙ

$$[. (147.8)]. \quad (186.6)$$

— $e x$,

$$(186.7) \quad (186.4),$$

$$n^2 = 1 + \frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (186.8)$$

n_0 ,

e_i ,

ω_{0i}

$$n^2 = 1 + \frac{n_0}{\epsilon_0} \sum_i \frac{e_i^2/m_i}{\omega_{0i}^2 - \omega^2}, \quad (186.9)$$

$$m_i \dots \quad (186.8) \quad (186.9)$$

§ 187.

()

(,)
 (186.8) (186.9)
 $\omega = \omega_0^2 > 1$
 $\omega = \omega_0^2 = \pm$;
 $\omega = \omega_0^2 < 1$
 ()

()
 ЯВЛЕНИЕ

. 273.
 ω_0

Бугера¹:

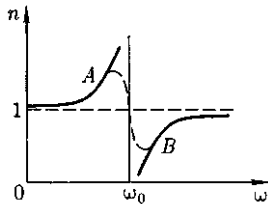
$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (187.1)$$

I_0 7—

$n(\omega)$ ω_0 A A — $x; \alpha$ —
 (n)
 ω ,
 (ω)
 (1876—1940) $= \frac{1}{\alpha} I_0$

X()

. 273



(. . , атомы

(1698—1758) — уче-

лированными) близкий
 (10^{-12} — 10^{-11})
 () .

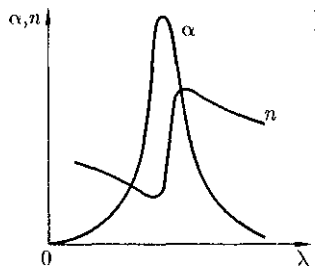


Рис.274

(10^{-10} — 10^{-7}) .
 (10^{-3} — 10^{-5}) ,

() .
 X)
 значительным,

наблюдаются
 полосы

(10^3 — 10^5) ,
 быстропеременные

рис. 274

длины

X

X

измерениях
 интенсивностей ()

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta} = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 + \beta \cos \theta}, \quad (188.1)$$

§ 188.

§ 159)

вакууме; $(\beta = \frac{v}{c}; 0 < \beta < 1)$

(188.1)

$$0 = 0$$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}. \quad (188.2)$$

(188.2)

() ,

$$(188.2) \quad \nu (v \ll c), \quad (3) \quad \beta^2,$$

$$\nu = \nu_0(1 - \beta) = \nu_0 \left(1 - \frac{v}{c}\right). \quad (188.3)$$

(§ 35),

(§ 36),

($< \nu_0, X > \lambda_0$) —

$X < \lambda_0$ —

($> \nu_0$,

(ν_0)
() .

$$0 = \dots$$

(188.1)

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \nu_0 \sqrt{1 - \beta^2}. \quad (188.4)$$

(188.4) определяет

при

(188.4)

(β . . .)

[(188.3)],

$v \ll$ (188.4)

($v = \nu_0!$),

1938 .

1900 .

. . . Белополюским (1854 — 1934)

1907 .

Б. Б. Голицыным (1862 1919).

§ 189.

Черенкова—Вавилова

П. . Черенков

(1904—1990),

v ,

$v > \frac{1}{n}$ (n —

ления) ,

ренкова—Вавилова.

образны

(. § 245),

— Вавилова

1937 .

(1895—1971)

1990) (П. .

1958 .

).

(1908

$v > \frac{1}{n}$,

— Вавилова). Счетчики
 — Вавилова,
 (§ 261).
 частицы. θ (
 :

$$\cos \theta = \frac{c}{nv}. \quad (189.1)$$

 (§ 105)
 — Таммом 1955 .
 представлений (§ 1905)
 роткоживущую —

- света?
- собой преломляющих лучей ?
- ?
- аномальной?
- отличить ,
- ?
- . 273.
- ?
- ?
- отлич волн
- стике? ?
- ?
- — ?

- 24.1. ($n = 1,5$)
 , если 25°. [14°21']
 24.2.
 . Определите,
 4x [10]

24.3. направлению

24.4.

$\lambda,$

$v = 0,15c$ ($c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек), $\lambda_0 = 0,6$ м, движется
 [51Г] (мегаэлектрон-вольтах),
 $= 1,5$

[0,17 МэВ]

Глава 25

§ 190.

излучатели,

§ 162)

:

E и

поперечность напряженностей

//

(и,

ориентациями

, II)

v

).

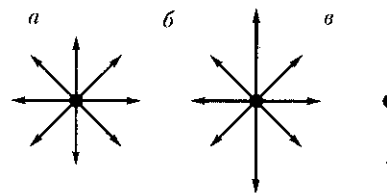
—

).

излучают

и колебани-
 (. 275, a;).

направлении,
 (. 275, в),
 ризованным {
 }.



.275

плоскополяризованной

§ 145) полярзации (φ , π), плоскополяризо-

$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$ и

f

(

мо-

(§ 70).

(. 276).

T_1

$00'$ (. § 192). T_1

ИНТЕНСИВНОСТИ

$$I = \frac{J_{\max} - J_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

$I_{\max} = I_{\min} = 0$, плоскополяризованного $I_{\min} = 0$ — 1.

плоскополяризованный,

Малюса¹:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha, \quad (190.1)$$

I_0 / —

$\alpha = 0$ (

. 277,

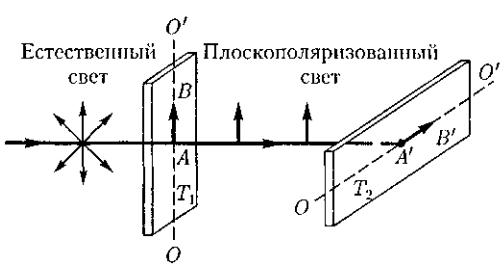


Рис. 27G

¹ .Мал (1775—1812) —

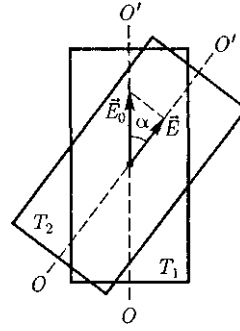
T_2 ,

T_2 :

E_0 ,

$$E = E_0 \cos \alpha.$$

(190.1).
кристаллами



$$(190.1), \\ I = I_0 \cos^2 \alpha.$$

(. 276),

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{сст}} \cos^2 \alpha,$$

плоскополяризованный.

$$I_{\text{max}} = I_{\text{сст}} \left(\frac{1}{2} \right) \\ I_{\text{min}} = 0$$

. 276

§191.

и A'

T_1 по T_2

T_1 , плоскополяризован-

T_2 ,

(поменять

плоскополяризованный

$$I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{сст}}$$

(. 278

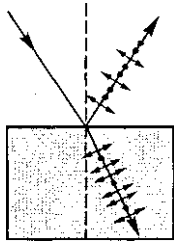


Рис. 278

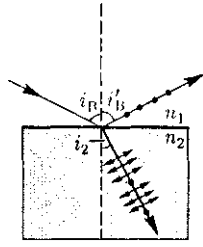


Рис. 279

ченны (),

(стрелками).

[определенной (

)]

1868)

тера),

i_B (*Брюс-* соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}$$

(n_{21} —

),

(

(рис. 279).

i_B

при

раздела

отраженны

куляры ($\operatorname{tg} i_B = \frac{\sin i_3}{\cos i_3}$, $n_{21} = \frac{\sin i_3}{\sin i_2}$ ($i_2 =$

), $\cos i_B = \sin i_2$).

, $i_B + i_2 = 90^\circ$, но $i_B' = i_B$

(), $i_B' + i_2 = 90^\circ$.

электромагнитно-

).

(

). (= = 1,53)

$\approx 15\%$, 8—10

§ 192.

Все

кубической

)

, . . .

, 1669 .

1698)

. Бартолином (1625—

(CaCO_3),

(. 280).

.280

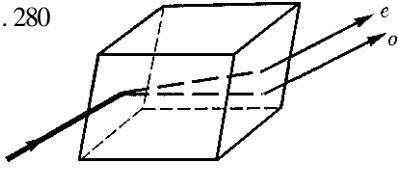
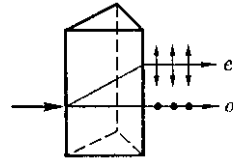


Рис. 281



необыкновенного

(. 281).
 получил телен
 (), —
 (o).

не

n_o

. Любая

n_c

и

Исследования

« »),

).

(

)

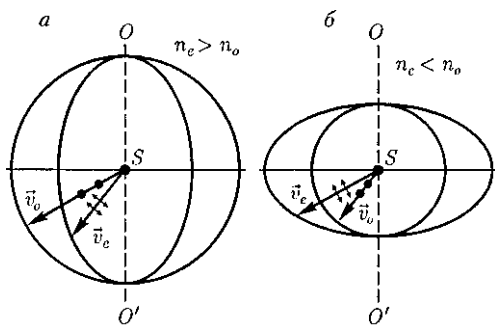
— $v_o = \frac{c}{n_o}$, необычно-
 разном $v_e = \frac{c}{n_e}$

(. 281).

(

и

).



. 282

пространяющегося
 $n_e - n_0, v_e = v_0, \dots$
 кой

v_e и v_0

($n_e > n_0$), $v_e < v_0$
 ($n_e < n_0$), $v_e > v_0$
 (. 282,)
 (. 282,)

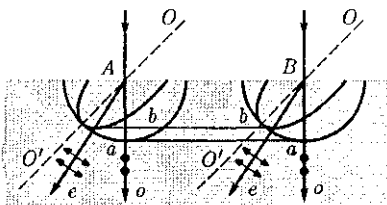
S ол-

(. 283).

. 282

($v_0 = \text{const}$)
 ($v_e \neq \text{const}$) —

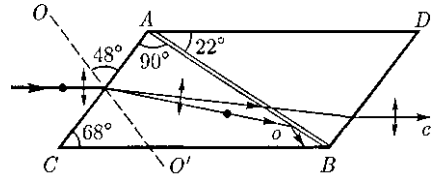
00'
 и
 00'
 (a-a)
 (b-b)
 ВОЛНЫ.



. 283

дан ном

§ 193.



. 284

1)

2)

(двойкопреломляю-)

BD).
Двойкопреломляющие

(§ 165)

перпендикулярными

(. 285)

николем.

(. 284)

луч

собой

с $n = 1,55$.

($n \approx n_e$)

OO'

48° .

на

грани

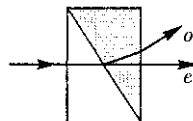
($n_o = 1,66$)

($n_e = 1,51$).

),

. 285

¹ У. Николь (1768 — 1851) — шотландский ученый.



дихрончного

1 мм

§194.

Дихрончные

герпатита (плоскополяризованный (286)).

≈0,1

ТОНКОМ

совершаются

— ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗГОТОВЛЯТЬ

X,

по

(

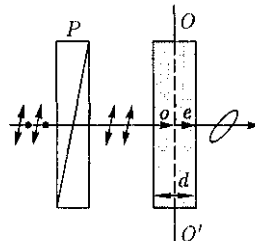
30 %)

[(145.2)]:

$$\frac{x^2}{E_o^2} - \frac{2xy}{E_o E_c} \cos \varphi + \frac{y^2}{E_c^2} = \sin^2 \varphi, \quad (194.1)$$

ослепляющего

Рис. 286



E_o и E_c —

; φ —

эллиптически

$$\Delta = (n_o - n_e)d,$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_o - n_e)d,$$

d — ; , —

Если $\Delta = (n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4}, \varphi = \pm \frac{\pi}{2},$
(194.1)

$$\frac{x^2}{E_o^2} + \frac{y^2}{E_c^2} = 1,$$

($E_o = E_c$ плоскополяризованном $\alpha = 45^\circ$)

$$x^2 + y^2 = E_o^2,$$

циркулярно

$$\Delta = (n_o - n_e)d = \pm \left(m + \frac{1}{4}\right)\lambda_0$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots),$$

($\frac{\pi}{4}$). «+»

« \leftrightarrow ». Плоскополяризованными, пройдя $\frac{\lambda}{4}$,

циркулярно ().

, φ .

$$(n_o - n_e)d = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda_0 (m = 0, 1, 2, \dots),$$

и

циркулярно
разность φ

$$\pm \frac{\pi}{2}.$$

$\frac{\lambda}{4}$,

$\pm \frac{\pi}{4}$. Результирующая 0 π .

(194.1), циркулярно плоскополяризованным $\frac{\lambda}{4}$,

[.

$\frac{\lambda}{4}$

(ни

).

пластинки интенсивность

,

;

—,

$$\pm \frac{\pi}{2}$$

ный

$$\begin{aligned}
 n_o - n_e - k_1 \sigma & \quad (\\
 n_o - n_e - k_2 E^2 & \quad (\\
 n_o - n_e - k_3 H^2 & \quad (\text{в } \text{поля}), \\
 k_1, k_2, k_3 & \quad \text{—} \\
 & \quad (\text{. § 21); и } II \text{ —}
 \end{aligned}
 \tag{195.1}$$

§ 195.

. 287

(. § 192).

анизотро-

и

: 1)

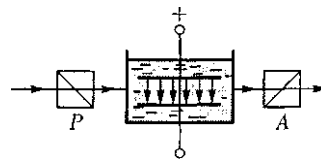
*Керра*¹;

щей;

двоукрепеломляю-

, следова-

Рис. 287



(1824 — 1904) —

§ 196.

$$\Delta = (n_o - n_e)l = k_2 l E^2 \quad (195.1)$$

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = 2\pi B l E^2,$$

— X —

вещество (),

(10^{-10})

плоскополяризованным.

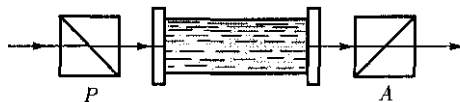
$$\varphi = \alpha d,$$

$$\varphi = [\alpha] C d, \quad (196.1)$$

d —

; α ([]) —
вращение,

на



. 288

вещества (1817).
 (); — ,
 , кг/м³.
 (196.1)

кристаллическом состо- ().

. 288.
). Следовательно, [] (196.1)

и название (или
 (по часовой), — ,
 ()). мн

- ? ? ?
- ? плоскополяризованным ?
- ?
- плоскополяризованный ?
- Брюстера?
- ,
- ? ?
- ? ?
- одноосных?
- ?

где $dW_{\nu, \nu+d\nu}^{изл}$ —

$$\left(\dots \right) \left(\dots \right)$$

ν до $\nu + d\nu$.

$$\left(\frac{R_{\nu, T}}{c} \right) \sim \left(\frac{1}{\nu^2} \right).$$

$h_{\nu, T}$ МОЖ-

— практически

$$dW_{\nu, \nu+d\nu}^{изл} = R_{\nu, T} d\nu = R_{\lambda, T} d\lambda.$$

$$= \lambda \nu,$$

$$\frac{d\lambda}{d\nu} = -\frac{c}{\nu^2} = -\frac{\lambda^2}{c},$$

$$\langle \rightarrow \rangle \quad (\nu \quad X)$$

« \rightarrow »

$$R_{\nu, T} = \frac{\lambda^2}{c} R_{\lambda, T}. \quad (197.1)$$

(197.1)

$$R_{\nu, T} \text{ и } R_{\lambda, T} \text{ и}$$

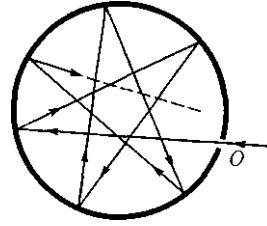
(излучательности)

$$R_T = \int_0^{\infty} R_{\nu, T} d\nu. \quad (197.2)$$

$$R_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{изл}}{d\nu},$$

$$A_{\nu, T} = \frac{dW_{\nu, \nu+d\nu}^{погл}}{dW_{\nu, \nu+d\nu}},$$

показывающей,



$$v \quad v + dv,$$

$R_{v,T}$ и $A_{v,T}$ зависят от

и v ($v \quad v + dv$). $A_{v,T}^c = A_T = \text{const} < 1.$

Тело,

тової

($A_{v,T}^u = 1$).

§ 198.

ним.

(. 289).

отверстия,

0,1

$$\frac{R_{v,T}}{A_{v,T}} = r_{v,T}. \quad (198.1)$$

$$A_{v,T}^u = 1, \quad [\quad . (198.1)]$$

$R_{v,T}$ для $r_{v,T}$.

тела —

$r_{v,T}$

не

ской

поглощательной

же

§ 199. Стефана—Больцмана

[. (198.1)]

$$R_{\nu,T} < r_{\nu,T} \quad (A_{\nu,T} < 1), \quad (198.1)$$

$\nu + d\nu$ ($A_{\nu,T} \neq 0$), то оно их этом T не (1835—1893), (1879), . Больцман, (1884),

(197.2)

$$R_T = \int_0^{\infty} A_{\nu,T} r_{\nu,T} d\nu.$$

$$R_e = \sigma T^4, \quad (199.1)$$

$$R_T^e = A_T \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = A_T R_e, \quad (198.2)$$

пени

$$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{К}^4).$$

Стефана—Больцмана,

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu \quad (198.3)$$

R_e

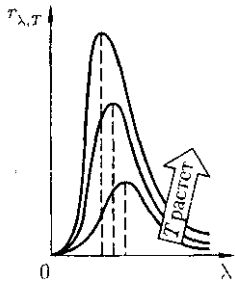
МОСТИ $r_{\lambda,T}$ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ \

$$(r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^4} r_{\nu,T}) \text{ при}$$

(. 290)

. Все

Рис. 290



которые

сторону

$r_{\lambda, T}$ от λ

R_c

В. Вии (1864—

1928),

λ_{\max} ,

$r_{\lambda, T}$,

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (199.2)$$

λ_{\max}

$r_{\lambda, T}$

$$2,9 \cdot 10^{-3} \cdot T \quad (199.2)$$

$r_{\lambda, T}$

§200. Рэля — Джинса

Больцмана

$r_{\nu, T}$ не

$r_{\nu, T}$ принадлежит

(1877—1946),

— Джинса

энергетической

$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \langle \epsilon \rangle = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT, \quad (200.1)$$

$\langle \epsilon \rangle$ — собственной

энергий

$$\langle \epsilon \rangle = kT \quad (200.1)$$

области



—Джинса

(. 291).

фана — Больцмана [. (199.1)]

—Джинса

(200.1)

[. (198.3)]

Планком

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu = \frac{2\pi kT}{c^2} \int_0^{\infty} \nu^2 d\nu = \infty,$$

[. (170.3)]:

$$\epsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

R_e пропорциональна

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ .}$$

».

ϵ_0 :

$$\epsilon = nh\nu \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

() ,

$$r_{\nu,T} = C\nu^3 A e^{-\frac{h\nu}{T}},$$

()
k .

ПО ВОЗМОЖНЫМ

$r_{\nu,T}$ —

(. § 45),

С и —

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}.$$

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}.$$

1900 .

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (200.3)$$

(199.1) (200.4)]. Кроме того, k , h — постоянные Стефана — Больцмана, ν — частота, λ — длина волны, T — температура. Выводимые формулы справедливы для всех длин волн, т. е. для всех смещений. (197.1) (200.3):

14 1900

(200.3)
— Джинса (200.1).

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} \approx 1 + \frac{h\nu}{kT}, \quad e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \approx \frac{h\nu}{kT}.$$

(200.3),

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{h\nu/(kT)} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT,$$

(200.1).

Планка

Стефана — Больцмана.

(198.3) (200.3),

$$R_e = \int_0^\infty r_{\nu,T} d\nu = \int_0^\infty \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu.$$

Введем безразмерную величину $x = \frac{h\nu}{kT}$; $dx = \frac{h d\nu}{kT}$; $d\nu = \frac{kT dx}{h}$.

R_e

$$R_e = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} T^4 \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \sigma T^4, \quad (200.4)$$

где $\sigma = \frac{2\pi k^4}{c^2 h^3} \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3}$,

$$\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}.$$

Планка

— Больцмана [(198.3) (200.3)].

(199.1) (200.4)]. Кроме того, k , h — постоянные Стефана — Больцмана,

ν — частота,

λ — длина волны,

T — температура.

Выводимые формулы справедливы для всех длин волн, т. е. для всех смещений. (197.1) (200.3):

$$r_{\lambda,T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{\nu,T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1},$$

$$\frac{\partial r_{\lambda,T}}{\partial \lambda} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^6 (e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1)} \left(\frac{hc}{kT\lambda} e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 5 \right).$$

λ_{\max} , при

равно нулю, т. е. $\frac{\partial r_{\lambda,T}}{\partial \lambda} = 0$, получим

$$xe^x - 5(e^x - 1) = 0.$$

Решение

найдем $x = 4,965$.

$\lambda_{\max} = 4,965$, откуда

$$T\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,965k} = b,$$

(199.2)].

h ,

k (

).

решение излучения. (198.2), (199.1)

$$R_T^c = A_T R_c = A_T \sigma T^4.$$

§ 201.

$$R_T^c = \sigma T_p^4.$$

, что

$$T = \sqrt[4]{A_T} T$$

(,). , использующие

$$A_T < 1, \quad T_p < , \dots$$

2.

(,) по СВЕТИМОСТИ

$$R_{\lambda,T} = A_T r_{\lambda,T},$$

$$A_T = \text{const} < 1.$$

используется , разлИ- И ярко-

стиую

1.

(199.2)]. λ_{\max}

$$R_{\lambda,T}$$

R_c [(198.3)]

R_T [см. (197.2)]

$$T_{\text{ц}} = \frac{b}{\lambda_{\max}},$$

цветовой

цмана (199.1)

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{R_T}{\sigma}}.$$

T_p

3.

($T_{\text{ц}} \approx 6500$) $T_{\text{я}}$ — , при

определенной

спектральной

$$r_{\lambda, T_y} = R_{\lambda, T}, \quad (201.1)$$

[(198.1)],

ных

$$\frac{R_{\lambda, T}}{A_{\lambda, T}} = r_{\lambda, T}, \quad (201.1),$$

$$A_{\lambda, T} = \frac{r_{\lambda, T_y}}{r_{\lambda, T}}. \quad (201.2)$$

$r_{\lambda, T_y} < r_{\lambda, T}$ и $T_y < T$, т. е.

пирометр с

нитью.

(201.1).

ный

яркостную темпера-

туру.

Зная

$A_{\lambda, T}$

(200.3)

$$r_{\lambda, T} = \frac{c}{\lambda^2} r_{v, T} = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

(201.2),

$$A_{\lambda, T} = \frac{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}{e^{\frac{hc}{kT_y\lambda}} - 1}$$

$A_{\lambda, T}$ и X

ределять

4.

изобретены

1876 .

1873 .

наилучшими

ческой

(,)

<1,1 , . . .

(≈0,55)

≈ 50)
3000 ,

и .
f)

потерь
повышения

().
(1887),

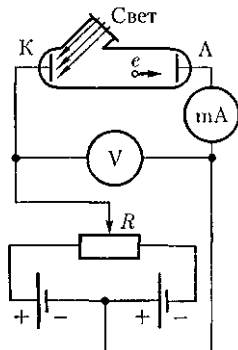
5 %.

. 292.

§ 202.

R

Рис. 292



1)

2)

; 3)

Дж. Дж. Томсон 1898 .

(

).

$$I_{\text{нас}} = en,$$

1 .

$$U = 0$$

в, , PI

ПОЛЯ.

$$U = U_0$$

U_0 .

v_{max}

$$\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = eU_0, \quad (202.1)$$

U_0 ,

на . 292,

E_c ВЕЩЕННОСТЯХ

. 293.

I.

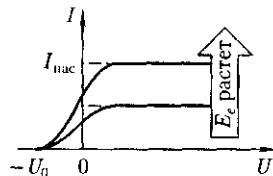


Рис. 293

II.

E_e).

§ 203.

III.

его

1905

ν_0

ν

(§ 200),

первын

$$\epsilon_0 = h\nu.$$

ны

(, чтобы ; металла

, каждый

вывод фотоэффекта.

II

(I). Безынерционность

электроном

совершение

III

A (§ 104)

безынерционность

mv_{\max}^-

. Та-

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (203.1)$$

1926 .
кпрский (1894 — 1954)

Эйнштейна
II III
(203.1)
линейно
не
(),]шА, (II
)
кинетическая
(— const),
 $\nu = \nu_0$
(III)
(203.1)

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \quad (203.2)$$

граница фотоэффекта
работы

(203.1)
(202.1) (203.2), виде
 $h\nu = h\nu_0 + eU_0$
Эйнштейна
(1916) поверхность

зависимость
кинетической энергии
[U_0 (.(202.1)]
 ν и

— (?? $\approx 1,5$)
)]
. 292.
 U_0 ()
/).
 h ,
[
(. § 200)
коротковолновой
(. § 299)].

(; . § 233),
(
,
,
 N фотонов ($N=2-7$).
фотоэффекта

$$Nh\nu = + \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

пучками

ВОЛН.

1922 1000 $1,8 \cdot 10^6$ 1 30

12

1 1000 1000 1 30

$$\lambda = 525 \text{ нм}$$

100—400
1

§ 204.

1)

(Ar Ne
, $\approx 1,3-13$).

($\approx 1 /$)

(20-150 /),

(

),

(.

. 157)

(. § 105).

$\approx 10^7$ (
1-1,5),

10 A/лм.

ВИДИ-

f

),

PbS, CdS, PbSe дру-

!!
ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

1,1 ,

(3—4 мкм),

напряжение — низ-

(),

$$\epsilon_0 = h\nu. \quad (205.1)$$

(),

энергия относительности,

(40.3)

пропорционалы

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

большую

2—30 /)

ЭДС.

$v = c \Pi$

роковые,

, куш-

[. (205.1)],

$$= m'V \quad (40.5)$$

$m = 0,$

(205.1),

$^2 - p^2c^2 -$

«10%» ,

$$p = \frac{\epsilon_0}{c} = \frac{h\nu}{c}. \quad (205.2)$$

«22 %»,

(205.1) (205.2)

пужд.

, падающий

зрения

(),

N

(§ 49)

ρN

$(1-\rho)N$

фотон

$= \frac{h\nu}{c}$, каждын

отраженными — $2 \frac{2h\nu}{c}$ (

—).

$1 \cdot N$

$$p = \frac{2h\nu}{c} \rho N + \frac{h\nu}{c} (1-\rho)N = (1+\rho) \frac{h\nu}{c} N.$$

(205.3).

$Nh\nu = E_c$ энергия

(§ 168),

а $\frac{E_c}{c} = w$ —

гии

§ 206.

Комптона

птон (1892 1962),

1923 .

$$p = \frac{E_c}{c} (1+\rho) = w(1+\rho). \quad (205.3)$$

(205.3),

(§ 163).

(§ 163),

дапо

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (206.1)$$

$\lambda' = \lambda_C$; $\lambda_C = 2,426 \text{ \AA}$.

$$W_0 = mc^2 ; \quad \epsilon = h\nu$$

(γ -излучений)

$$W_0 + \epsilon = W + \epsilon'$$

$$W_0 + \epsilon = W + \epsilon' \quad (206.2)$$

$$\vec{p} = \vec{p}_e + \vec{p}' \quad (206.3)$$

$$W_0 = mc^2 ; \quad W = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4}$$

$$\epsilon' = h\nu'$$

$$(206.2)$$

$$(206.3)$$

. 294,

$$mc^2 + h\nu = \sqrt{p_e^2 c^2 + m^2 c^4} + h\nu' \quad (206.4)$$

$$p_e^2 = \left(\frac{h\nu}{c}\right)^2 + \left(\frac{h\nu'}{c}\right)^2 - 2\frac{h\nu}{c}\frac{h\nu'}{c}\cos\vartheta \quad (206.5)$$

$$(206.4) \quad (206.5)$$

(. 294) —

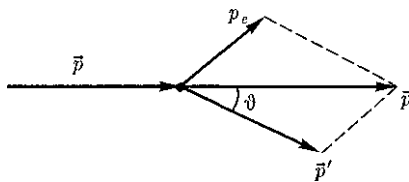
= —

$$mc^2(\nu - \nu') = h\nu\nu'(1 - \cos\vartheta).$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \nu' = \frac{c}{\lambda'} \text{ и } \Delta\lambda = \lambda' - \lambda, \text{ ПОЛУЧИМ}$$

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\vartheta) = \frac{2h}{mc}\sin^2\frac{\vartheta}{2} \quad (206.6)$$

$$(206.6)$$



. 294

(206.1).

h, m сдает

$$\lambda_c =$$

$$= \frac{h}{mc} = 2,426 \text{ пм.}$$

()

электроном.

§ 207.

ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ

λ'

X

Комптона

« »

, так

$$\epsilon = h\nu, \quad p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

качестве

, что

].

корпускулярно-волновыми

к

()

([])

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

температуры,

?

?

?

?

$r_{\lambda,T}$

?

$r_{\nu,T}$ и $r_{\lambda,T}$

Планка

— ?

?

фотосопротивлением?

?

- определяется ?
- замене , ?
- I II ?
- освещенностям , ?
- Комптона?

26.1. $T_1 = 500$; $T_2 = 2000$: 1) ; 2)

[1) 256 ; 2) 4.35] $T_1 = 2900$.

26.2. = 9 . T_2 . [290]

26.3. $\lambda_0 = 275$. [4,52]

26.4. $U_{01} = 6,6$, СВЕТЛОМ $\nu_1 = 2,2 \cdot 10^{15}$ м, $\nu_2 = 4,6 \cdot 10^{15}$ с⁻¹ — $U_{02} = 16,5$. [6,6 • 10⁻³⁴ •]

26.5. . [0,51]

26.6. 600 , 0,1 мкПа. 10^{-2} , 1 . [9 • 10¹⁶]

26.7. 100 нм 180° . [580]

α-частиц (1), действием:

$$\frac{Zee}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{m_e v^2}{r}, \quad (208.1)$$

α-частицы (20 000) ε₀ — ; m_e
 и v — (208.1)
 180°. Так : r и v.

), r, v (208.1)

1911 . } r ≈ 10⁻¹⁰ (208.1)
 Ze (Z — v ≈ 10⁶ / , — —
 = 10²² / ² .

10⁻¹⁵ — 10⁻¹⁴ , 10⁻¹⁰

Z

взаимодействия

§ 209.

(1825—1898)

$$\frac{1}{\lambda} = R' \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots), \quad (209.1)$$

$R' = 1,10 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{м}}$
Ридберга¹.

(209.1) может

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 3, 4, 5, \dots), \quad (209.2)$$

$R = R'c = 3,29 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ — также

(209.1) (209.2)

n линии

=

к

(XX)

ультрафио-

$$\nu = R \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 2, 3, 4, \dots).$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 4, 5, 6, \dots);$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 5, 6, 7, \dots);$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 6, 7, 8, \dots);$$

$$\nu = R \left(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n = 7, 8, 9, \dots).$$

Бальмера:

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (209.3)$$

m

, — 1, 2, 3, 4, 5, 6 (

), с $m + 1$ (

(, Li, Na,) —

бергу

¹ И. Ридберг (1854—1919) — шведский
 , специалист

были
 1913 .
 (1885—
 1962).

§ 210.

m_e — ; ν —
 n -й $r_n: \hbar = \frac{h}{2\pi}$.
):
 ()
 энергией
 $h\nu = E_n - E_m$, (210.2)

E_m — [E_n и
 ()].
 $E_m < E_n$
 (

), $E_m > E_n$ —
 (, . . .
).
 частот $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$ квантовых перехо-
 линейчатый

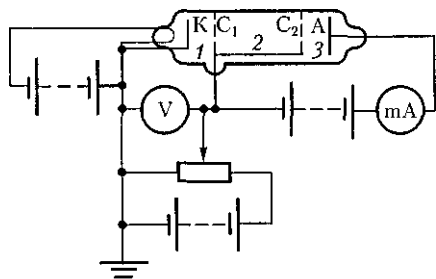
§ 211.

$m_e v r_n = n \hbar$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), (210.1)

(1913),

рис. 295.

(
 13),
 (C_1 и C_2)



.295

C_1 .

C_2

(0,5) 4,86

4,86

2

1,

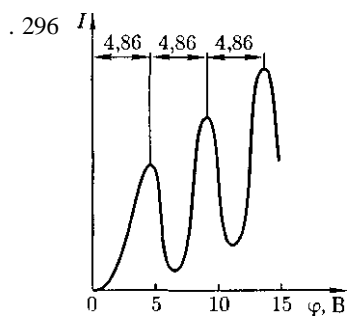
$e\varphi = 4,86$

3,

$e\varphi = 4,86$

4,86

2,3,...



(.296).

4,86

(

),

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 \cdot 4\pi\epsilon_0}{m_e Z e^2}, \quad (212.1)$$

$$= 1, 2, 3, \dots \quad (212.1)$$

$$[\dots (210.2)],$$

$$= 4,86$$

$$: X = \frac{h c \nu}{\lambda} \approx 255 \text{ нм.}$$

$$4,86$$

$$X \approx 255$$

$$X \approx 254$$

$$(Z = 1) = 1,$$

(a),

$$r_1 = a = \frac{\hbar^2 \cdot 4\pi\epsilon_0}{m_e e^2} = 0,528 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 52,8 \text{ пм}, \quad (212.2)$$

§ 212.

поле $(-\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r})$:

$$E = \frac{m_e v^2}{2} - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$[\dots, \text{ что } \frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}; \dots (208.1)].$$

$$n \quad (212.1),$$

зарядом Ze

и $\text{He}^+, \text{Li}^{2+}$,

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (212.3)$$

« »

$$(212.3)$$

$$(208.1) \quad \frac{v^2}{2} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \text{ предложен}$$

$$(210.1),$$

(212.3), n ,
 $(\dots) = 1$
 > 1
 (\dots) ; ;

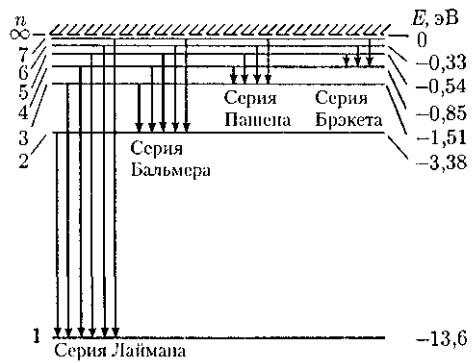


Рис. 297

(Z=1), (212.3),

(§ 209).

. 297.

(212.3)

$(E_1 = -13,6 \text{ эВ}) = 1$
 $(E_\infty = 0) = \dots$
 $E_\infty - 0$
 (\dots) .
 [(210.2)],
 (Z = 1)

(212.4) $= I$ и $= 2, 3, 4, \dots$,

(§ 209)

(? = 2, 3, 4, ...)

(= 1).
 $= 2, 3, 4, 5, 6$ и

$$h\nu = E_n - E_m = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right),$$

$$\nu = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (212.4)$$

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2}$$

R

Лаймана.

ОСНОВНОМ СОСТОЯ-

= 1),

()).

?

(

).

- ядерная модель ?
- ?
- n и m в ?
- ?
- ? объясняется
- ? . 296
- ?
- — 5. ?
- ?
- , = 3 — 4. , могут возникнуть при
- на
- ?
- , (212.3) $E_n = -\frac{13,6 \text{ эВ}}{n^2}$, E_n выражается

27.1.

() . $[E_{\text{max}} = 13,2 \text{ эВ}, E_{\text{min}} = 10,2 \text{ эВ}]$

27.2.

[364 нм]

27.3.

Бора,

$[p_m = \frac{enm}{h} = 1,8 \cdot 10^{-23} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}]$

21.4.

Бора,

$X = 1,212 \cdot 10^{-7} \text{ м} \cdot [AL = \hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$

- 27.5. [13,6]
 27.6. , энергия $E_i - 13,6$,
 . [12,1]
 27.7. , $E_i = 13,6$,
 Лаймана. [10,2]

28

§213.

ВОЛНОВОИ
 :
 (1892 — 1987), (213.2)
 1923 . 1927 .
корпускулярно-волнового (1881 1958) . (1896 —
 1971)
 —
 — (182.1), а
 — p ,
 — (213.2).
 ν и X.
 :
 (213.1) ≈ 50)
 (толщиной ≈ 1 мкм).
 (213.1)
 () .

1948 .
В. . Фабриканту (1907 — 1991). Он

$$\lambda = \frac{h}{mv},$$
$$X = 6,62 \cdot 10^{-31} .$$

(
 $d \approx 10^{-31}$
).
СВОИХ СВОЙСТВ —

$$10^4$$

),

$$\epsilon = h\nu. \quad (213.3)$$

(213.3)

ПОЗВОЛИЛО

(213.3)

(213.2).

корпускулярно-

(. § 182),

§ 169).

корпускулярно-волнового

(1898 — 1974):

«

?
1 , движущейся

$$= \frac{pc^2}{E} = \frac{mcc^2}{mc^2} = c, \dots$$
 « — ».
 (§ 154).
 (214.1) $v_{\text{фаз}} = \frac{c^2}{v}$
 $= \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$,
 (1959).

§ 214.

НО-ВОЛНОВОГО

$$v = \frac{m}{m} \quad (\text{ § 155}, \text{ « } \dots \text{ »})$$

 (154.8),

$$v_{\text{фаз}} = \frac{\omega}{k} = \frac{\hbar\omega}{\hbar k} = \frac{E}{p} = \frac{mc^2}{mv} = \frac{c^2}{v} \quad (214.1)$$
 времени
 являлось то, что

$$\left(\frac{E}{p} = \hbar\omega \text{ и } \frac{c^2}{v} = \hbar k, \quad \frac{c^2}{v} > v, \right)$$

$$v_{\text{фаз}} > c \quad (\dots)$$
 « $v_{\text{фаз}}$ », ()
 (155.1),

$$u = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(\hbar\omega)}{d(\hbar k)} = \frac{dE}{dp}$$
 свободной —

$$= \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} \text{ [см. (40.6)]}$$

$$\frac{dE}{dp} = \frac{pc^2}{\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}} = \frac{pc^2}{E} = \frac{mvc^2}{mc^2} = v$$
 [(39.3) (40.3)].

§ 215.

расплыванию» (10^{-26} !)

$$(p_x, p_y, p_z),$$

ленности

$$\Delta x \Delta p_x \geq h; \Delta y \Delta p_y \geq h; \Delta z \Delta p_z \geq h, \quad (215.1)$$

определенной

h .

$$(215.1)$$

состоянии точ-
($= 0$),

$$(\Delta p_x \rightarrow \dots),$$

, ν

$$[\dots (213.1)],$$

соотношение

$$\Delta x,$$

$$(\dots 298).$$

X

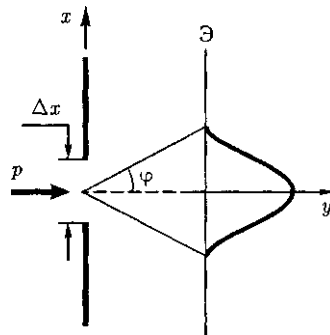
1927 .

. 298

берга,

()

(x, y, z), И



не (),
 ()
 пе , ()
).

$$p_x = 0, \quad \Delta p_x = 0,$$

положение ()
 x)
 , ...

2φ (φ — , соответствующий)
).

(213.1), . 298

$$\Delta p_x = p \sin \varphi = \frac{h}{\lambda} \sin \varphi. \quad (215.2)$$

(. § 179)

$$\Delta x \sin \varphi = \lambda, \quad (215.3)$$

Δx — ; X — (215.1) в

(215.2) (215.3)

$$\Delta x \Delta p_x = h, \quad \Delta x \Delta v_x \geq \frac{h}{m}. \quad (215.4)$$

$$\Delta p_x \geq p \sin \varphi.$$

$\Delta x \Delta p_x \geq h$, этой
 неопределенностей (215.1).

10^{-12}
 10^{-6}

0,01 (10^{-8}),

, по (215.4),

$$\Delta v_x = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^{-8} \cdot 10^{-12}} \text{ м/с} = 6,63 \cdot 10^{-14} \text{ м/с},$$

$$v \approx 2,3 \cdot 10^6 / \text{с} \approx 0,5 \cdot 10^{10}$$

$$= 10^8 / \text{с},$$

$$0,01 \% (\Delta v_x \approx 10^4 / \text{с}).$$

(215.4),

$$\Delta x = \frac{h}{m \Delta v_x} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 10^4} =$$

$$= 7,27 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

ЖИЗНИ.

(215.5)

$$\lambda v = \frac{h}{h},$$

частотой, равной $\nu = \frac{h}{h}$.

$$\approx 10^{-10} \text{ ($$

$\Delta x \approx$

(215.4), $\Delta v_x = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-10}} =$

$$= 7,28 \cdot 10^6 / \text{с}.$$

§ 216.

XX .

§ 200) 20

1900 . (

XX .;

(1887—1961),

(1902—

1984).

Необходимость

ВОЛНЫ

(1882 1970)

1926 .

не

и

$\Psi(x, y, z, t)$.

W (Ψ-функция) |Ψ|² dV
 W : V
 W ~ |Ψ(x, y, z, t)|² (216.1)
 (|Ψ|² = ΨΨ*, *—)

∫_{-∞}^{+∞} |Ψ|² dV = 1, (216.3)
 +dy, z и z+ dz. x и + dx, t, z +∞.

дW = |Ψ|² dV. (216.2)
 (Ψ-функции)
 |Ψ|² = dW / dV

Ψ = ∑_n C_nΨ_n
 C_n (= 1, 2, ...) —
 W = ∫_V dW = ∫_V |Ψ|² dV.

), (z z + dz.

)

1926 . . .

()

$$\langle r \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} r |\Psi|^2 dV,$$

(216.3).

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi + U(x, y, z, t) \Psi = i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (217.1)$$

§ 217.

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}; m$$

$$\left(\Delta \Psi = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right); i - U(x, y, z, t) -$$

(. § 216)

(. § 215)

$\Psi(x, y, z, t) -$

(217.1)

. § 225),

(0;

)

: 1)

(. § 216);

$\Psi(x, y, z, t),$

| |²,

2)

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x}, \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \frac{\partial \Psi}{\partial z}, \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

; 3) | |²

t dV, т.е.

x + dx, y и y+dy,

вероятностей

(216.3).

идея
плоская волна.

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx),$$

$$\xi(x, t) = A e^{i(\omega t - kx)}.$$

(217.1)

ОНО

$$\Psi = A e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - px)} \quad (217.2)$$

(217.1)

Ψ от

ω = $\frac{E}{\hbar}$, k = $\frac{p}{\hbar}$.

механике

«—», но

$$| \quad |^2,$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{i}{\hbar} E \Psi; \quad \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \left(\frac{i}{\hbar}\right)^2 p^2 \Psi = -\frac{1}{\hbar^2} p^2 \Psi,$$

$$U = U(x, y, z)$$

откуда

$$E = -\frac{\hbar}{i} \frac{1}{\Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \frac{1}{\Psi} i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}; \quad (217.3)$$

$$p^2 = -\frac{1}{\Psi} \hbar^2 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}.$$

$$p(E = \frac{\quad}{2})$$

(217.3),

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad (217.1)$$

$$U = (\quad).$$

U,

Е и p' дан-

$$\frac{v'}{c} = U,$$

(217.1).

$$\Psi(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) e^{-\frac{i}{\hbar} E t}, \quad (217.4)$$

$$(217.4) \quad (217.1),$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} e^{-\frac{i}{\hbar} E t} \Delta \psi + U \psi e^{-\frac{i}{\hbar} E t} =$$

$$= i \hbar \left(-\frac{i}{\hbar} E\right) \psi e^{-\frac{i}{\hbar} E t};$$

$$-\frac{i}{\hbar} E \psi \text{ и}$$

ψ:

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0. \quad (217.5)$$

(217.5) называется

СМЫСЛ.

ледующий

ψ.

[(215.1)],

§218.

$$\Psi(x, y, z, t),$$

$$|\Psi(x, y, z, t)|^2$$

, , z.

$$\Psi(x, y, z, t) \quad (217.1),$$

$$\psi(x) = Ae^{ikx} = Ae^{h} \Psi(x, t).$$

$$\Psi_0(x, t) \quad (217.4),$$

$$\Psi(x, t) = Ae^{-i\omega t + ikx} = Ae^{-\frac{i}{\hbar}(Et - p_x x)} \quad (219.3)$$

$$\left(\omega = \frac{E}{\hbar} \text{ и } k = \frac{p_x}{\hbar} \right). \quad (219.3)$$

$$[\dots (217.2)]. \quad (219.2)$$

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} = \frac{p_x^2}{2m}$$

§ 219.

частицу ()

$$U(x) = \text{const}$$

$$(217.5)$$

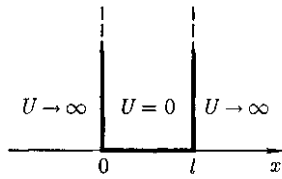
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0. \quad (219.1)$$

$$|\Psi|^2 = \Psi \Psi^* = |A|^2,$$

§ 220.

$$\psi(x) = Ae^{ikx}, \quad (219.1) \quad = \text{const} \quad = \text{const},$$

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}. \quad (219.2)$$



$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k^2 \psi = 0, \quad (220.3)$$

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}. \quad (220.4)$$

(220.3):

$$\psi(x) = A \sin kx + B \cos kx.$$

$$(220.2) \psi(0) = 0, \quad = 0.$$

$$\psi(x) = A \sin kx. \quad (220.5)$$

$$(220.2) \psi(l) = A \sin kl = 0$$

$$kl = n\pi, \quad -$$

$$k = \frac{n\pi}{l}. \quad (220.6)$$

$$(220.4) \quad (220.6)$$

, что

$$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (220.7)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0. \quad (220.1)$$

« »),

« »),

(

)

« » (

- 0 = l)

$$\psi(0) = \psi(l) = 0. \quad (220.2)$$

« » ($0 \le x \le l$)

$$(220.1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi = 0$$

ИЛИ

СОСТОЯНИИ .

(220.6), (220.5)

$$\psi_n(x) = A \sin \frac{n\pi}{l} x.$$

(216.3),

$$A^2 \int_0^l \sin^2 \frac{n\pi}{l} x dx = 1.$$

ЧММ $\sim \sqrt{\frac{E}{l}}$,

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (n=1, 2, 3, \dots). \quad (220.8)$$

(220.8),

$$(220.7) \quad = 1, 2, 3, \dots$$

$$= \psi_n(x) \psi_n^*(x) = |\psi_n(x)|^2 = \dots$$

(220.7)

$$\Delta E_n = E_{n+1} - E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} (2n+1) \approx \frac{\pi^2 \hbar^2}{ml^2} n. \quad (220.9)$$

$$l \sim 10^{11} \text{ м}$$

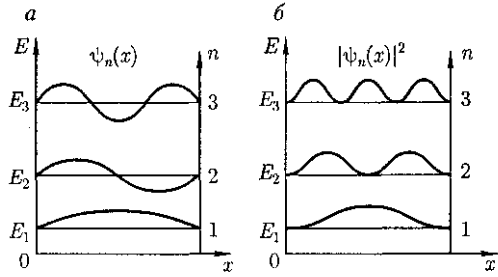


Рис. 300

$$\Delta E_n \approx 10^{-35} n \approx 10^{-16} n \text{ эВ}, \dots$$

$$\Delta E_n \approx 10^{-17} n \approx 10^2 n \dots$$

, квантово-механическое

$$\frac{\pi^2 \hbar^2}{2l^2} [\dots (220.7)].$$

« » l равна $= l$.

$$(215.1),$$

$$\Delta p \approx \frac{h}{l}$$

§ 221.

$$E_{\min} \approx \frac{(\Delta p)^2}{2m} = \frac{\hbar^2}{2ml^2} \quad (\dots > 1)$$

$$(220.9) \quad (220.7)$$

$(n \gg 1)$

$$\frac{\Delta E_n}{E_n} \approx \frac{2}{n} \ll 1,$$

(1923),

Рассмотрим

(... 301, a) (x)

U и /

$$U(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 & (\text{для области } 1), \\ U, & 0 \leq x \leq l & (\text{для области } 2), \\ 0, & x > l & (\text{для области } 3). \end{cases}$$

(... > U),
(... < U) и

> U,

< U

> l, ...

$v \ll$

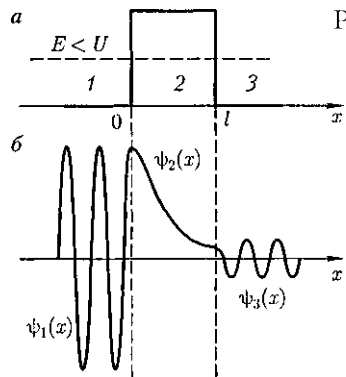


Рис. 301

Шредингера (217.5)

на . 301,

$$\frac{\partial^2 \psi_{1,3}}{\partial x^2} + k^2 \psi_{1,3} = 0$$

$$(1 \text{ и } 3 \quad k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2});$$

$$\frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} + q^2 \psi_2 = 0$$

$$(2 \quad q^2 = \frac{2m(E-U)}{\hbar^2}).$$

$$(1); \quad (221.2)$$

$$\psi(x) = A_2 e^{iqx} + B_2 e^{-iqx}$$

$$(2);$$

$$(3). \quad (217.4),$$

$$\begin{aligned} \Psi_1(x,t) &= \psi_1(x) e^{-\frac{i}{\hbar} Et} = \\ &= A_1 e^{-\frac{i}{\hbar}(Et - \hbar kx)} + B_1 e^{-\frac{i}{\hbar}(Et + \hbar kx)}. \end{aligned} \quad (221.4)$$

(219.3),

), — ,
(, ...) .

$$(221.3)$$

(), 3

$$(221.3)$$

$$E > U \quad < U.$$

< U

$$(221.1), \quad q = i\beta -$$

Учитывая \hbar $q \quad B_3 = 0,$

$$\psi_1(x) = A_1 e^{ikx} + B_1 e^{-ikx}$$

(для области 1);

$$\psi_2(x) = A_2 e^{-\beta x} + B_2 e^{\beta x} \quad (221.5)$$

(для области 2);

$$\psi_3(x) = A_3 e^{ikx}$$

(3).
(221.5)

$$B_2 \approx 0, \quad \beta l \gg 1,$$

$$\psi_1(x), \psi_2(x) \quad \psi_3(x)$$

. 301, б,

вая (221.7)

3, D_0 — ; U — ; l — (221.7)

D / $(U - E)$;

(. 302),

« »

$$D = D_0 e^{\left[-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U-E)} dx \right]}$$

$U = U(x)$.

$$D = \frac{|A_3|^2}{|A_1|^2}$$

$< U$

$$\frac{|A_3|^2}{|A_1|^2}$$

$= 0$ ψ ψ' = l (. 301):

$$\begin{cases} \psi_1(0) = \psi_2(0), \\ \psi_1'(0) = \psi_2'(0), \\ \psi_2(l) = \psi_3(l), \\ \psi_2'(l) = \psi_3'(l). \end{cases} \quad (221.6)$$

$$B_1 \quad B_2 \quad A_1 \quad (221.6)$$

$A_2, A_3,$

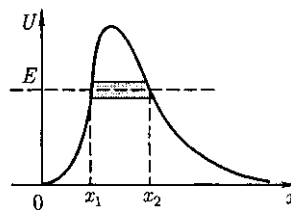


Рис. 302

$$\frac{(\Delta p)^2}{2}$$

и М.А. Леонтовича (1903 – 1981).

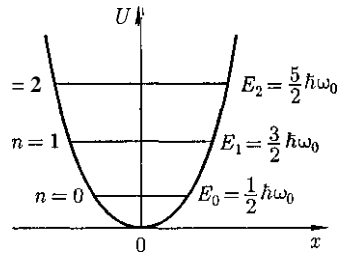


Рис. 303

§ 222.

(
 $\pm x_{\max}$
 $(-x_{\max}, +x_{\max})$.
 «
 $-x_{\max} \leq \leq x_{\max}$ »
 »
 (217.5),
 (222.1) Пре-

[(141.5)]

$$U = \frac{m\omega_0^2 x^2}{2}, \quad (222.1)$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{m\omega_0^2 x^2}{2} \right) \psi = 0, \quad (222.2)$$

ω_0 — ; — (222.1) (222.2)

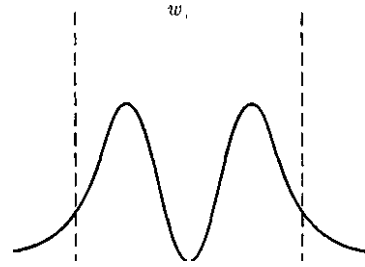
(303), . . . «
 »

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \omega_0. \quad (222.3)$$

(222.3)

(. . . 17).

« » (§ 220),
 $E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega_0$.



.304

(222.3)

« » (. 303),

$$\hbar \omega_0, \quad E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega_0.$$

« ».

$$-x_{\max} \leq \leq x_{\max} ($$

. 17),

$$= 0$$

(. 304,)

. 304,

$$w = 1.$$

$$\rightarrow 0$$

$$w \geq x_{\max}, \dots$$

« ».
 шие « » w няется
 рьер (. § 221).

- ?
- $\frac{\Delta v_x}{v_x} \ll 1$? $\frac{\Delta v_x}{v_x} \approx 1$? ДВИЖЕ-
- спектральных ? естественной
- Почему ? ?
- « »? « » ?
- ? « », = 3 « » = 1?
- ? ?
- ДВИЖЕНИИ ? < U ?
- ? ? ?
- ? ?
- «ямы»? « »?
- « »?
- ? КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКОГО ?

28.1. $v_{\text{фаз}} u = \dots$?

28.2. 1 % ?

? [= 33 ;]

28.3. ψ -Функция $\psi = \dots$, $r = \dots$

центра. [$\langle r \rangle = \frac{a}{2}$] $\langle r \rangle$

- 28.4. Шредингера ,
- 28.5. « »
/ « ».
« », W обнаружения
состоянии (= 2).
результата, . [W=0,195]
0,1 . Определите
- 28.6. U — ,
0,99. [0,1]

29

§ 223.

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0, \quad (223.2)$$

(водородоподобных :
He⁺,
Li⁺⁺ .)
кулонов- (223.2)
: r, θ , φ . He

Ze (, Z- 1), ,

$$U(r) = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (223.1) \quad \text{СМЫСЛ.}$$

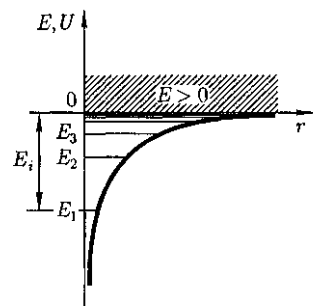
1.

r —

U(r)
. 305. U(r)
r (при
)

ψ ,

(217.5),
(223.1):



(223.2)

самои

ψ ,

2.

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (223.3)$$

(223.2)

$$\psi_{nlm_l}(\rho, \theta, \varphi),$$

:

l

m_l

(223.3),

« § 220)

(§ 222),

$n = 1, 2, 3, \dots$

E_1, E_2, E_3, \dots

. 305

E_l ,

$(E_n > E_1,$
 $= 2, 3, \dots) —$
 < 0

(§ 212).

$$L_l = \hbar \sqrt{l(l+1)}, \quad (223.4)$$

$l —$

».

$$l = 0, 1, \dots, (l-1), \quad (223.5)$$

$= E_\infty = 0.$ > 0

> 0

(§ 305)

L_l

L_{lz}

$$E_i = -E_1 = \frac{m e^4}{8 h^2 \epsilon_0^2} = 13,55 \text{ эВ.}$$

(223.3)

(212.3),

\hbar :

$$L_{lz} = \hbar m_l, \quad (223.6)$$

$m_l \sim$

l

(дискретные

дискретные

$$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm l, \quad (223.7)$$

... $2l + 1$. Шредингера ,
 , m_l , ψ .

$2l + 1$ ориентаций.

квантовой

$2l + 1$ подуровней.

1896 .
 П. Зееманом
 (1865—1945)
Зеемана. уровней

« » , (

эксперименталь-
Штарка¹.
 (223.3)

l и
 $m_l \sim$, кванто-

E_n (E_l)

ψ_{nlm_l}
 / m_l .

, по

$l = 0$, s (

троном), $l = 1$ — p-состоянием, $l = 2$ —
 d-состоянием, $l = 3$ — /

$$- 1 [\dots (223.5)],$$

$$l \dots 2l + 1$$

$$m_l (223.7),$$

$$= 2 \quad l = 0 \quad 1$$

$2s$ и 2 .

$$\sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = n^2. \quad (223.8)$$

. 306

()
 $= I$ и $= 2$,

$|\psi_{nlm_l}|^2$.

, l и m_l .

(1874—1957) — немецкий

$l = 0$

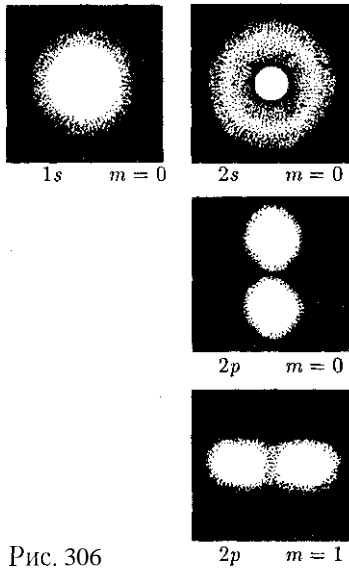


Рис. 306

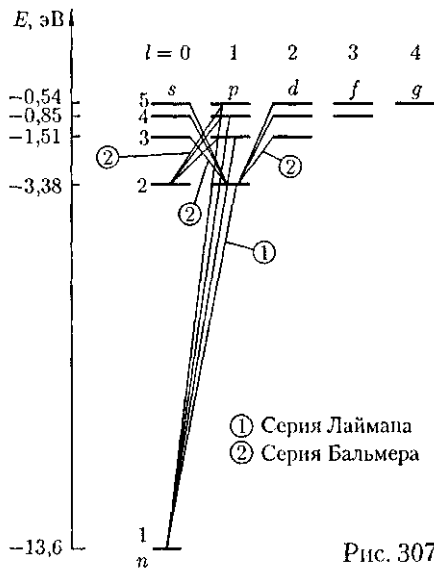


Рис. 307

(),

3. , и m_l $\Delta l = 2$.

() , ,

. 297). (. , ,

ДИПОЛЬНОГО , «

ПОЛЬНЫХ ($\Delta l = 2$) , «

»

(223.9),

1) l : (. 307).

$\Delta l = \pm 1$; (223.9) $\rightarrow 1s (n=2, 3, \dots)$;

2) Δm_l — серии

$\Delta m_l = 0, \pm 1$. $np \rightarrow 2s, ns \rightarrow 2p, nd \rightarrow 2p (n = 3, 4, \dots)$;

..

$$(216.3)$$

(224.1),

$$1 = \int_0^{\infty} |\psi|^2 dV = \int_0^{\infty} C^2 e^{-\frac{2r}{a}} 4\pi r^2 dr.$$

$$C = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}}. \quad (224.2)$$

$1s \rightarrow np$

(224.2)

($n = 2, 3, \dots$),

(224.1),

$1 \ll$

§ 224. 1s-Состояние

1s-Состояние

$$\psi_{100}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}}. \quad (224.3)$$

ψ

[(216.2)]

$$dW = |\psi|^2 dV = |\psi|^2 4\pi r^2 dr.$$

$\psi = \psi_{100}(r)$, где цифры

$l = 0$

(224.3),

$m_l = 0$.

$$w = \frac{dW}{dr};$$

1s-состояния

$$w = \frac{1}{\pi a^3} e^{-\frac{2r}{a}} 4\pi r^2 dr.$$

$$\psi = C e^{-\frac{r}{a}}, \quad (224.1)$$

r_{\max}

$$a = \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{me^2}$$

[(212.2)]

$$r_{\max} = \frac{a}{2}$$

(216.3).

ψ -функции

r

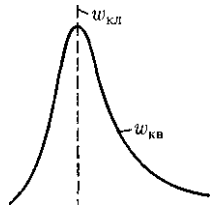
dV ,

ский

$$dV = 4\pi r^2 dr.$$

r

dr :



Уленбек (1900—1974) (1902—1979)

$r =$ (см. § 131).

(. 308).

квантово-механический

§225.

О. Штерн

(. § 131),

1922 ..

s -состоянии,

[. (223.4)].

[. (131.3)],

(223.6):

$$L_{sz} = \hbar m_s,$$

m_s —

$$: m_s = \pm 1/2.$$

линии

орбитальным

§226.

$$(|\psi|^2)$$

) многоэлектронным

квантово-механи-

Таким

(, квантовые). Та-

тиц,

$$|\psi|^2,$$

$$|\psi(x_1, x_2)|^2 = |\psi(x_2, x_1)|^2, (226.1)$$

x_1 и x_2 —

времени

$$(226.1)$$

обладают индивидуальностью, поэтому

$$\psi(x_1, x_2) = \pm \psi(x_2, x_1),$$

к

симметрично,

§ 227.

того, что свойство — или

(,) (, ,)

и под — Ди-

нулевым (, π-мезоны, и подчиняются — Эйнштейна; (,) , являются (— полуцелый), ().

(1900 1958),

тождественные

фермионов

v

(квантово-механическая).

(1925)

фермионов

v

$$\begin{aligned} & (n = 1, 2, 3, \dots), \\ & l (l = 0, 1, 2, \dots, n - 1), \\ & m_l \\ & (m_l = -l, \dots, -1, 0, +1, \dots, +l), \\ & m_s \\ & (m_s = +1/2, -1/2). \end{aligned}$$

же

Таблица 11

	1		2			3			4			5			
		L					N								
	2	8		18			32			50					
число l	0	0	1	0	1	2	0	1	2	3	0	1	2	3	4
подоболочки	1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	5g
подоболочки	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18

0 — 1, подоболочек
 l, m_l и m_s, \dots
 $Z(n, l, m_l, m_s) = 0$ 1,
 $Z(n, l, m_l, m_s) =$,
 : , l, m_l, m_s .
 , , представлены . 11.

§ 228.

(223.8),
 m_s
 $(\pm 1/2)$.
 , . . . (1869) —

$$Z(n) = \sum_{l=0}^{n-1} 2(2l+1) = 2n^2.$$

МНОГО-

подоболочкам,
 l .

(, Ga, Se, Ge)
 . . И.

прибавлением

Be U,

1s,
 — 1,
 1s,

$$l = 0, m_l = m_s = \pm 1/2$$

()

1s² (

1s-электрона).

K-оболочки,

Таблица 12

Период	Z	Элемент	K			L			M			N				Период	Z	Элемент	K			L			M			N			
			1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	1s	2s	2p				3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f						
I	1	H													IV	19	K	2	2	6	2	6	— 1								
	2	He														20	Ca	2	2	6	2	6	— 2								
II	3	Li	2	1										21	Sc	2	2	6	2	6	1	2									
	4	Be	2	2										22	Ti	2	2	6	2	6	2	2									
	5	B	2	2	1									23	V	2	2	6	2	6	3	2									
	6	C	2	2	2								24	Cr	2	2	6	2	6	5	1										
	7	N	2	2	3							25	Mn	2	2	6	2	6	5	2											
	8	O	2	2	4						26	Fe	2	2	6	2	6	6	2												
III	9	F	2	2	5					27	Co	2	2	6	2	6	7	2													
	10	Ne	2	2	6						28	Ni	2	2	6	2	6	8	2												
	11	Na	2	2	6			1			IV	29	Cu	2	2	6	2	6	10	1											
	12	Mg	2	2	6			2				30	Zn	2	2	6	2	6	10	2											
	13	Al	2	2	6	2		1				31	Ga	2	2	6	2	6	10	2	1										
	14	Si	2	2	6	2		2				32	Ge	2	2	6	2	6	10	2	2										
	15	P	2	2	6	2		3				33	As	2	2	6	2	6	10	2	3										
	16	S	2	2	6	2		4				34	Se	2	2	6	2	6	10	2	4										
	17	Cl	2	2	6	2		5				35	Br	2	2	6	2	6	10	2	5										
	18	Ar	2	2	6	2		6				36	Kr	2	2	6	2	6	10	2	6										

I

(. 12). Li ($Z=3$), $l=0$, $m=0$, $n=3, l=2$. Ca ($Z=20$)

K -оболочке $= 2$ (L -оболочке 45 TV

), . . $2s$ -состояние. Li: $1s^2 2s$. [Sc

Li II ($Z=21$) Zn ($Z=30$), TV

Be ($Z=4$) Kr ($Z=36$), Ne

$2s$ Ar, s p -состояния

($Z=10$) Ne IV

$2p$ (. 12). II

неоном —

подоболочка

2 Na ($Z=11$) Rb, Cs, Fr

($= 3$), s со

$3s$

$1s^2 2s^2 2p^6 3s$ Электрон ($2s$ -элек- стоянии.

Li) валентным (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) —

Li. $Z=12$ 5 p -состояния

Ar ($Z=18$)

Ne: s p -состояния . Ar

III [($Z=57$)

($Z=71$) [($Z=103$)] —

($Z=89$)

электрон ($Z=19$)

$3d$ -состояние

Li Na, 4,

валентный s 14

нии. 19 ,

s 5s,

ТОЛЬКО s и б.с.

(TV), . . ($6s^2$)

TV

($7s^2$).
 Q-оболочка
 объясняется
 8
 (s и p -состояния);

(Li, Na, Rb, Cs, Fr)
 5 ; оболочке
 (Be, Mg
 Ca, Sr, Ba, Ra) s -электро-
 ; (F, Cl, Br, I, At)
 инерти

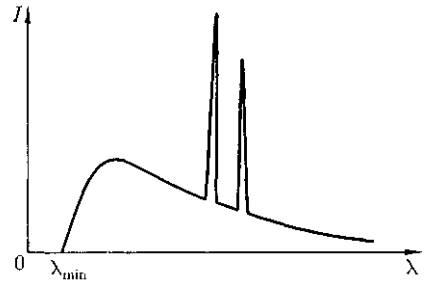


Рис. 309

(. 309)

§229.

распределения энергий
 1895 .
 (1845 — 1923)

(гласии

W Pt),

$10^{-12} - 10^{-8}$.

(. § 182).

λ_{\min} .

, вызыва-

, НАХОДЯТСЯ СО-

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = eU,$$

ν_{\max} — ; U —

E_{\max} .

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{\nu_{\max}} = \frac{ch}{eU} = \frac{ch}{E_{\max}}, \quad (229.1)$$

(229.1)

h ,

. 310.

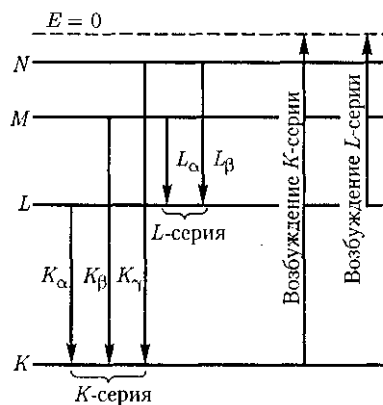
K -оболочки

L, M, N, \dots

спектр (

ВОЗНИК-

, L, M, N и .
 , $(\alpha, \gamma, \dots (K_{\alpha}, K_{\beta}, K_{\gamma}, \dots, L_{\alpha}, L_{\beta}, L_{\gamma}, \dots))$.



.310

$K_\alpha (L \rightarrow K), K_\beta (M \rightarrow K), K_\gamma (N \rightarrow K)$ и т.д. (229.2) (209.3)

длинноволновой K -се-

$$K_\alpha \rightarrow K_\beta \rightarrow K_\gamma,$$

K -оболочку

$$Ze, (Z - \sigma)e,$$

K_α -линии

$$= 1,$$

$$K_\alpha \rightarrow K_\beta \rightarrow K_\gamma,$$

L -оболочки K -оболочку N .

$$\nu = R(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right).$$

K -серия

§ 230.

$L, \dots,$

и ковалентная (§ 71).

(1887 1915)

1913

(NaCl, KBr)

$$= R(Z - \sigma)^2 \quad \mathbf{1} \quad (229.2)$$

ИОНОВ.

ν —

; R —

(H_2, C_2, \dots)

; $\sigma = 1, 2, 3, \dots$ (определяет рентге-),

(

, $m + 1$ ()).

).

(§ 226),

$$E_{эл} : E_{кол} : E_{вращ} = 1 : \sqrt{\frac{m}{M}} : \frac{m}{M}$$

$$, \approx 10^{-5} - 10^{-3}$$

$$E_{эл} \gg E_{кол} \gg E_{вращ} ; E_{эл} \approx 1 - 10 \text{ эВ}, E_{кол} \approx 10^{-2} - 10^{-1} , E_{вращ} \approx$$

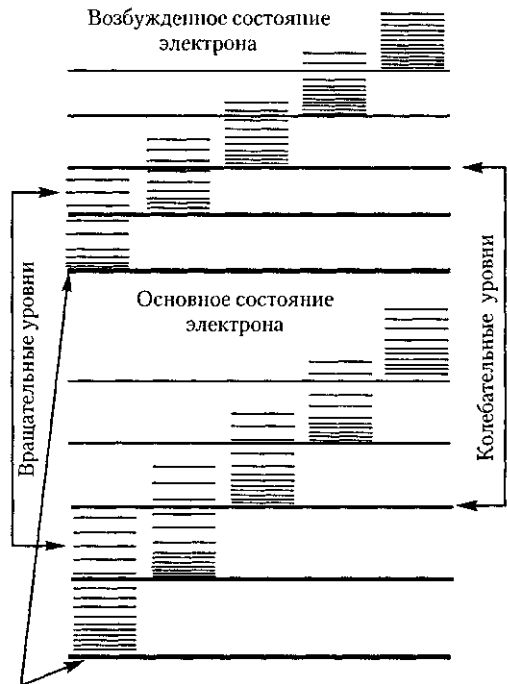
(230.1)

(

)

$$\Delta E = h\nu.$$

$$\Delta E_{вращ}$$



$$E \approx E_{эл} + E_{кол} + E_{вращ} \quad (230.1)$$

$E_{эл}$ —

; $E_{кол}$ —

(

); $E_{вращ}$ —

(

).

(230.1)

пе

Рис. 311

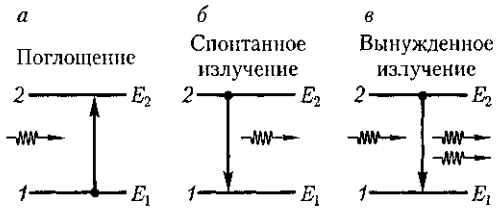
$\Delta E_{\text{кол}}$, и
 $\Delta E_{\text{эл}}$. 311
 уровни сложный.
 (— ,
 линиями). —
 § 231, . ,
 , , ,
 .
§ 231. .
 () .
 () ,
 молекулы .
 ,
 (,) .
 , 1928 . С. Ландсберг
 , (1890 1957) . .
 ± 1 . Ч. Раман
 (1888—1970) и К. Кришнан (. 1911)
 .
 , (, ,
)
 ()
 () I J ,
 $E_{\text{кол}}$ и $E_{\text{вращ}}$, (ν_i)
 .

v $(-\nu_i)$,
 $v, -$ $(\nu + \nu_i)$, ...
 $)$.

- следующим
 : 1) ,
 ; 2) ν_i ,
 ,
 и , ... ; 3) (,
 ; 4)) ,
 , ... ,

§ 232.

E_1, E_2, E_3, \dots
 (1 2) $E_1 E_2$.
 ОСНОВНОМ СОСТОЯНИИ I , ТО
 2
 (. 312,),
 (,
) ,
 (СОСТОЯНИЯ ,
 (,
) . 2,
 ,
 ,
 (



.312

),

$$hv = E_2 - E_1.$$

()

(. 312,).

1916 . .

(200.3).

$$hv = E_2 - E_1,$$

$$hv = E_2 - E_1 \quad (. 312,).$$

К

(—)

1939 . . .

состояний). заселенности

М. М. Вудынский, . . . ; 1951)

на §233.

()

инверсий населенностей.

новых —
(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation —)

()

()

()

(1922—2001) . . .
(1916—2002)
(. 1915),
1964 .

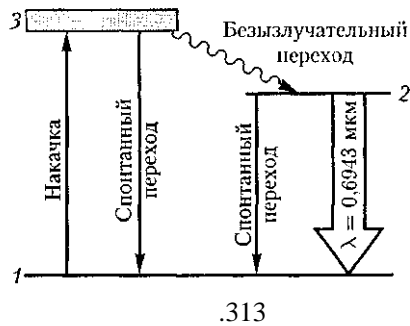
[. (187.1)]

$$I = I_0 e^{-\alpha x}$$

и
(активной)

— , электроионизацион-

населенностей; 2)
ки () ; 3)
(,



(1960;), работающим
(
0,6943),
[. Мейман (. 1927)].

1955



Cr^{3+} (0,03 0,05 %

3 (. 313).

(10^{-7}),
переходы $3 \rightarrow 1$ (

2 (он

$2 \rightarrow 1$

2 10^{-3} , . . .

(, зеркала

, что от одного из них ная уровни

торцов,

3 (рис. 314).

$$X = 0,6328$$

1.

(§ 171).
 10^{-3}

$$10^5 \quad (l_{\text{кор}} = c\tau_{\text{кор}}), \dots$$

(1961)

2. ($< 10^{-11}$).

3.

их

$$W = 20$$

$$\Phi_e = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{S} \text{ Дж/с} =$$

$$= 2 \cdot 10^4$$

$$= 2 \cdot 10^{10} / \frac{\Phi_e}{S} \cdot \frac{1 \text{ н}^4}{10^{-6}} / \dots =$$

4.

направленный

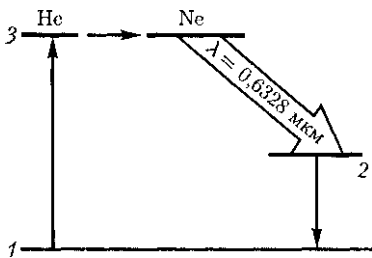


Рис. 314

3 (

ра

40 000).

— 0,01 ()
75 % ()

0,1—1 %.

CO₂-лазер

(X = 10,6),
(30 %)

комнатной

1 10¹⁴ ()
юстировочных

(, (. § 184).

24 —8).

(, CO₂-

),

(0,7—30)

- ? : , ?
- ВОЗМОЖНЫЕ / m_i = 5?
- состояний соответствует = 4?
- ?
-

• ? направление ?
 • ? фермионами ?
 • ?
 • фермионами, ?
 • и L -оболочки, $3s$ -подоболочка , $3p$ -подоболочке? ?
 • ()
 • ? : 1) ; 2) ; 3) германия;
 • 4) .
 • ?
 • — ?
 • ?
 • линий ? $(K_\beta, K_\alpha, L_\beta)$
 • ?
 • M -серия ?
 • ?
 • ?
 • ?
 • ?
 • стоксовы ? антистоксовы ? ?
 • , ?
 • населенностей? ?
 • ?
 • ? ? ?
 • ? ? ?
 • ли фермионах? ?
 • ? ?
 • ?

29.1. = 5. [25]

29.2. (,)
 $l=2 \quad l=1$. [$d \rightarrow p$ -переход].

29.3. , $1s$ -состояния

$\psi = "$ (—), ,

$a = \pi \frac{\hbar^2}{m e^2}$, равная метрично.

29.4. L_l ; 2) в f -состоянии. : 1) момент $(L_{lz_{\max}})$ на па-

29.5. поля. [1) $3,46\hbar$; 2) $3\hbar$] соответствует = 3.

29.6. : 1) $m_s = 1/2$ $l=2$; 2) $m_s = -1/2$ и $m_l = 0$. [1) 5; 2) 3]

29.7. $[6,61 \cdot 10^{-31} \text{ Дж} \cdot \text{с}]$ 50 , 24,8 .

K -серии . [20] .

Глава 30

§ 234.

тронки

, , з и

p_x, p_y, p_z .

«

»

$6N$. $6N$ -мерное

$6N$

$6N$

(§ 226).

$$dqdp = \dots dq_{3N} dp_1 dp_2 \dots$$

q — ; —

N частиц.

Корпускулярно-волновой

(§ 213)

$6N$ пе- (§ 215)

$$h^3 \left(\frac{dW}{h} \right)$$

$$f(E_n) = A e^{-\frac{E_n}{kT}},$$

$f(q, p):$

$$dW = f(q, p) dq dp. \quad (234.1)$$

$dW -$

$dq dp,$

$q, p.$

$, dW$

$q, q + dq$ и $p, p + dp.$

(234.1),

$$\int f(q, p) dq dp = 1,$$

$f(q, p),$

$$\langle L(q, p) \rangle = \int L(q, p) f(q, p) dq dp. \quad (234.2)$$

§ 235.

Бозе—Эйнштейна Ферми—Дирака

N_i —

состояния (i)

(§ 226),

: 0, 1, 2, ... (§ 227).

(1839 — (§ 226),

1903).

: 0 —

1 —

(§ 227).

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} + 1}, \quad (235.2)$$

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} + 1} \quad (235.1)$$

$\langle N_i \rangle$. — Дирака.

(§ 227):

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} - 1}. \quad (235.1)$$

Бозе — $\frac{E}{kT} \gg 1$, (235.1) — (235.2)

называется :

$$\langle N_i \rangle = A e^{-\frac{E_i}{kT}} \quad (235.3)$$

[выражением (44.4)],

$$A = e^{\frac{\mu}{kT}}. \quad (235.4)$$

« »

$$\mu \leq 0,$$

$\langle N_i \rangle$

Оп бозе-газа,

Ферми — Дирака².

— Эйнштейна (235.1) (235.2)

² (1894—1974) — (1901—1954) —

(235.3).

$$T_0 = \langle N(E) \rangle \quad (235.2),$$

$$\langle N(E) \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu_0}{kT}} + 1} \quad (236.1)$$

$T \gg T_0$, то
()

§ 236.

$$\langle N(E) \rangle = -f(E), \quad f(E) =$$

(§ 227),

$$(236.1)$$

$$\langle N(E) \rangle = 1,$$

$$\langle N(E) \rangle = 0, \quad > \mu_0.$$

$$315, a. \quad \langle N(E) \rangle = \mu_0$$

при

$$= \mu_0,$$

«

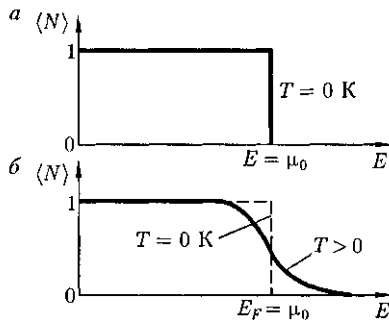
$$\mu_0,$$

$$\mu_0$$

— Дирака (235.2). μ_0 —

и

$$E_F (E_F = \mu_0).$$



$$\langle N(E) \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1} \quad (236.2)$$

ся

$$E_F,$$

315

ЭКСПОНЕНТОН

на. Таким

$$(-E_F) \gg$$

$$kT \ll E_F.$$

$$(-E_F) \ll k$$

§ 237.

T_0

(. § 235)

$$kT_0 - E_F$$

$$T_0 \approx 10^4$$

(. § 53).

принимать

(236.2)

— Дн-
1

$$(\ll \Delta E),$$

$$E_F \text{ (рис. 315,)} \cdot (kT) \text{ в}$$

$$= \dots > 0$$

E_F ,

$$\frac{E_F}{< E_F}$$

(. § 230),

$$\dots \Delta E_{\text{вращ}} \ll \Delta E_{\text{кол}}$$

$$> E_F -$$

температуры

$$T_0 = 3 \cdot 10^4, \text{ — } 10^{-5}$$

(. . 82).

(—) $\gg kT$ («хвост»

(236.2)

$$= 0 > 0 \text{ (. 315)}$$

().
нагревания

. Этим

§ 103).

(. § 73),

(
)

— Эйнштейна (. § 235),
(их спин

(
).

(235.1)

μ

ВЫСО-
 $\gg T_D$

корпускулярно-волново-

ноны,

$= \hbar\omega$.

(. § 73),
 $T \ll T_D$ (

$: C_V \sim T^3$.

(

). Фононы

T_D —

$kT_D \sim \hbar\omega_D$,

ω_D —

(238.1),

(
) (. § 73 . 115). — — [(. § 103) $\frac{1}{T}$,
 $\gamma \sim 1$,
 (. § 31, ()
 75). (1941) . . (1947) § 103). (.
 (. 1909), (.
 § 239).

, ДВИЖЕНИЮ

§ 238.

(
) — «
 »
 — , —
 , —
 , « — »,
 ,
 ,

$$\gamma = \frac{ne^2 \langle l_F \rangle}{m \langle u_F \rangle}, \quad (238.1)$$

(103.2) γ , «
 » неоднородностях,

$\langle l_F \rangle$ — ; «
 »
 ; $\langle u_F \rangle$ — ,

$\sim \sqrt{T}$, $() \sim$, скачкообразным
 (. § 103). γ ,
 $\langle u_F \rangle$,
 (II ; . § 75).
 « (поле
 » () ,
 $\langle l_F \rangle \sim$ "1,
 () (1882 — 1974),
 (R ~ —)
 T. (. § 98)
 () .

§ 239.

, . . .
 1957 .
 (1941 .)
 (. § 237).
 Д. Бардином
 (1908 1991), Л. Купером (. 1930)
 (. 1931)
 () ,
 () , сверхтекучестью ()
 ()

МСПЯЮТСЯ

(10^{10})

(10^{15}),

- ?
- — ? —
- ?
- ? ? ?
- , — ?
- ? теплоемкостей
- фонон? ?
- ? ?
- ? ?
- ? ?

- 30.1. — Дирака — Больцмана.
- 30.2. (— E_F) \ll , : 1) — Дирака;
- 2) —
- 30.3. X КСІ, энергий? [$= 0,02$; X = 63,5] $T_D = 227$.
- 30.4. $[= 4^{11}$] 4 .
- 30.5. 7 . 4 , . [3]

Глава 31

§ 240.

О , ,
 — , состоя-
 , —

динамической

поле.

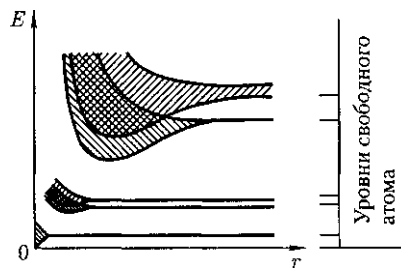


Рис. 316

легкие

316,

r

(. 316).

« »

ПО-

451

§221).

§ 241.

10^{-8}).

10^{-15} (

) \sim [. (215.5)].

10^{-7} ,

$\approx 1 - 10$,

.316 ,

0

« »

:

(свободной зоне),

10^{-22} .

»

СОСТОЯНИЯМ.

на .317. .317,

(

)

« » (

),

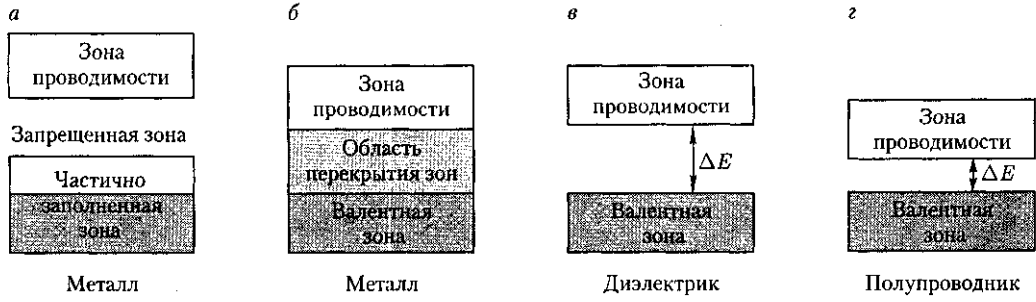


Рис. 317

$$= 1$$

$$kT \approx 10^{-4}$$

$$(10^{-22})$$

(. 317,).

элементов,

(. 317,).

(1),

II
(Be, Mg, Ca, Zn, ...).

«

» ,

(. 317,).

=

NaCl = 6),

германия = 0,720),

Si, Ge, As, Se,

Ge, Se,

: InSb, GaAs,

CdS

0

§242.

(.318).

ПОЛЯ

-0

«

II

»

(.317,)

(.negative—)

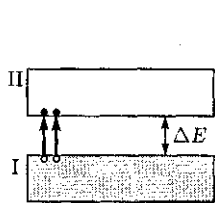
I

II

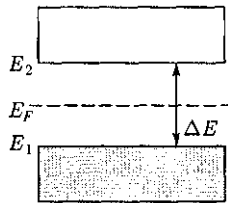
V VI

(IV,

на



.318



.319

направлении,

(positive —
).

$$n_e = C_1 e^{-\frac{E_2 - E_F}{kT}}, \quad (242.2)$$

C_1 —

; E_2 — (319);

n_e и n_p , то

E_F —

; — термодинамиче-

$$n_e = n_p. \quad (242.1)$$

т.д.).

(319).

ВНЕШНЕМ

$$n_p = C_2 e^{-\frac{E_1 - E_F}{kT}}, \quad (242.3)$$

C_2 —

; E_1 —

отсчитывается

(319),

$$(242.3)$$

(242.2).

$$n_e = n_p (242.1),$$

$$C_1 e^{-\frac{E_2 - E_F}{kT}} = C_2 e^{-\frac{E_1 - E_F}{kT}}.$$

$$(m_e^* = m_e^*), C_1 = C_2, \\ -(E_2 - E_F) = E_1 - E_F, \\ E_F = \frac{\Delta E}{2},$$

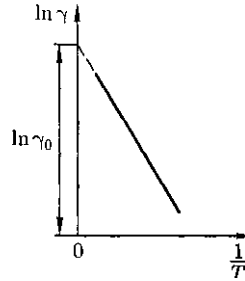
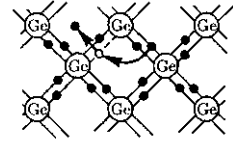


Рис. 320



.321

— Дирака (235.2)

$$(236.2) E - E_F \approx,$$

$$\langle N(E) \rangle \approx e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (242.4)$$

(§ 71)

$$\langle N(E) \rangle.$$

Ge

$$\gamma = \gamma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (242.5)$$

γ_0 —

(

).

)

(. 320),

германия
(. 322, a)

германия,

электронов

следовательно,
§ 242,

(242.4).

(. 322,).

§ 243.

D

германия

$$\Delta E_D = 0,013 \quad \Delta E_D < kT,$$

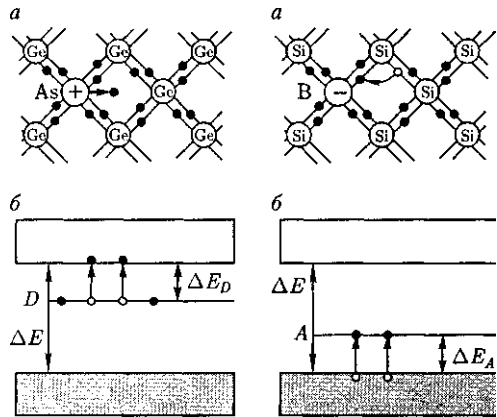


Рис.322

. 323

;

$$\Delta E_A = 0,08 \quad (\text{ . 323, }).$$

n-muna).

$$(\text{ . 323, }).$$

$$= 0$$

$$(\text{ . 324}).$$

E_F .

E_{F_0}

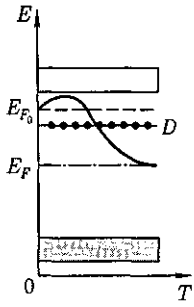
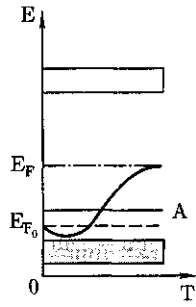


Рис. 324



. 325



Рис. 326

флуктуаций,

. 326

$\ln \gamma$ $\frac{1}{T}$

A

p-типа

$T =$

E_{F_0}

BCсоответ-

(. 325). (

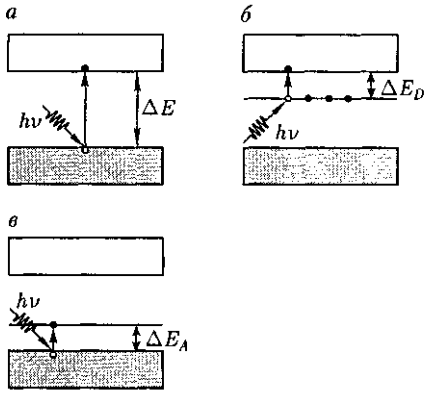
CD

),

§ 244.

(. § 202)

носителей



.327

$$(hv \geq \dots)$$

(. 327,)

) ()

$$hv < \dots$$

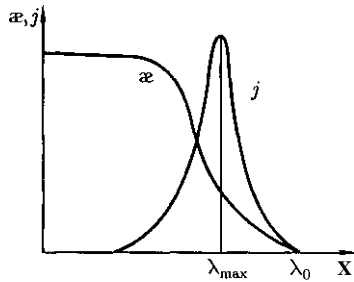
$$hv \geq \Delta E_D,$$

$$- hv \geq \Delta E_A.$$

n (. 327,)

p-типа

.328



(. 327,)

n

p-типа.

$$hv \geq \Delta E; \quad (244.1)$$

$$hv \geq \Delta E_{II}. \quad (244.2)$$

(ΔE_{II} —

),

$$(244.1)$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\Delta E};$$

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\Delta E_n}.$$

ΔE_{II}

, МОЖНО

. 328

j

X

$X > \lambda_0$

$$\approx 1 \quad (\approx 10^6 \text{ м}^{-1}).$$

.Экситоны

10^{-15} ,

10^{10} .

— Вавилова

(. § 189)

§ 245.

(,) ,
() ,
() ,

γ -излу-
) ,

, γ -излучением . . .

($t \leq 10^{-8}$)

150

1852 .

(. § 197),

¹ . Стокс (1819—1903) —



. 329

(. 329).

$h\nu$

$$h\nu = h\nu_{\text{люм}} + \Delta E,$$

$$\nu_{\text{люм}} < \nu \quad \lambda_{\text{люм}} > \lambda,$$

люфосфора

1924 .. —

(. 331).

$h\nu$

перемещается

η

λ

. 330.

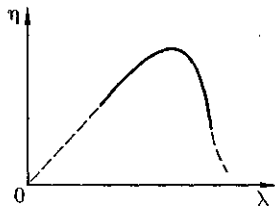


Рис. 330

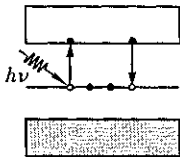


Рис. 331

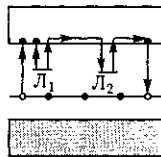


Рис. 332

люфосфор

, L_1 и L_2 ,

(. 332). (. § 233) сцинтиллятров
(
(. § 169),

§ 246.

(1745 — 1827)
Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg,
Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd

называется

— ВОЛЬТ.

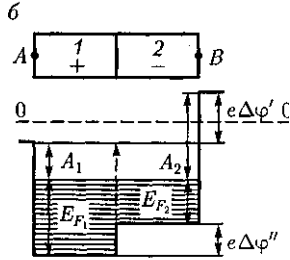
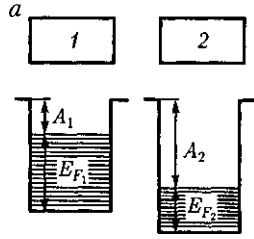
(
 $10^{-10} / ^3$),

1.

2.

(
)

. 333



A_1 A_2 , . .

).
 $A_1 < A_2$ (
 . 333,),

2.

1
 2,
 1
 2 —

(. 333,).

A_1 A_2

(
),

. 333,),

$$\Delta\varphi' = \frac{A_2 - A_1}{e}. \quad (246.1)$$

(246.1),

тная разность

$$\Delta\varphi'' = \frac{E_{F1} - E_{F2}}{e}. \quad (246.2)$$

$\Delta\varphi''$

T

(
 E_F),

, $\Delta\varphi'' \ll \Delta\varphi'$.

электрический ,

(
) ,

).

(

(

),

Пельтье

1.

(1821).

(1770 — 1831)

10^{-10} , . . .

, контакты

2 %

ток.

1 2

T_1

() T_2 () ,
 $T_1 > T_2$ (. 334).

—
заметному

слоя

(, Cu—Bi, Ag—Cu,
Au—Cu)

$$\mathcal{E}_T = \alpha(T_1 - T_2).$$

ЭДС

$T_1 > T_2$. 334

(1 → 2 2 → 1)

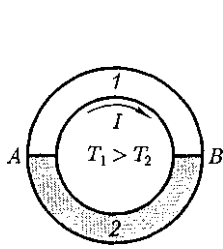
« —
100

»,

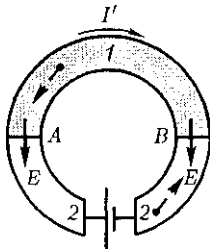
4,25 .

§ 247.

(246.2),



.334



.335

КЕЛЬВИН,
 $\approx 0,01$

$\approx 18\%$.

термо-ЭДС.

2.

(1834).

1845)

(1785 —

()).

Пельтье

Зеебека

, состоящие

() (),

$I' = 2(\dots 335),$
 I' [

. Чувствитель-

.334

$T_1 > T_2$]. (

).

темпера-

()

I'

§ 248.

металл — полупроводник

(—)
).
 (.335)
 пройдут и ,
 , меньшей n A_M
 .
 .336, , .
 $A_M >$,
 ,
 ,
 , — .
 1954 . , . , ,
 3. (1856). , ,
 (), ,
 , ,
 () ,
 .
 10^{22} см^{-3} (10^{15} см^{-3})
 $10 \sim 6$, . .
 10 000 , .
 , , —
 , , ,
 , ,
 , ,
 $d = 10^{-6}$ $\Delta\varphi \approx 1 \text{ В}$
 $= d \cdot 10^8 / .$

(\dots), p -типа;) $A_M < \dots$,
 p -типа. \dots 337.
 $A_M < \dots$,
 n

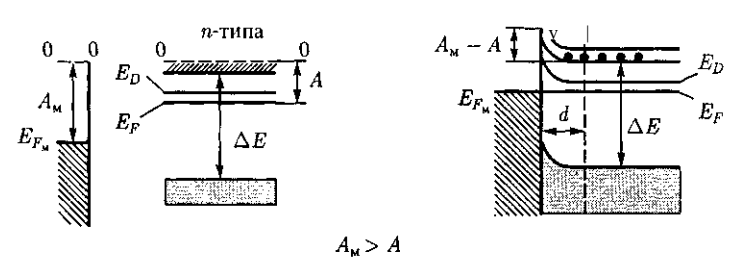
(\dots 336,).

, $A_M > \dots$ (\dots 337,).

n ($A_M > \dots$)

p -типа
 $A_M < \dots$ (\dots 337,),

:) $A_M < \dots$,
 n ;) $A_M > \dots$,



$A_M > A$
 Рис. 336

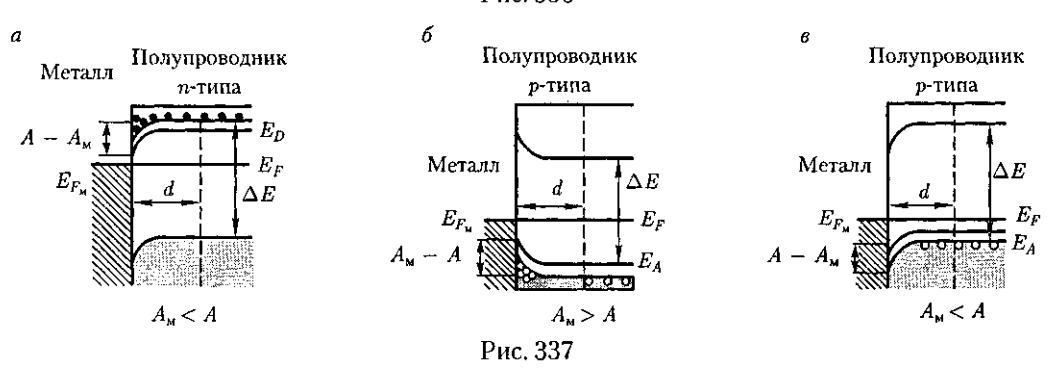


Рис. 337

носители —
 $A_M >$

(. 337,),

($A_M <$) —

§ 249.

(p-n-переход)

336,),

337,).

германия n

« » (. 338, a).

; 500 °

(In),

(Ge),

германия

p n (. 338,).

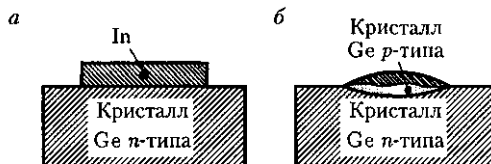


Рис. 338

— это

n ($A_M >$)

p - n -переходе (. 339).
 $-A_n$, (. 339,)
 $-A_p$, (. 339,)
 n ,
 p -полупроводник,

n ,
 $n \rightarrow p$
 $\rightarrow n$.
 И d_1 и d_2 (. 339,),
 $(d_1 = d_2)$.

n \rightarrow .
 (. 339,).

p -полупро-

(. 339,).

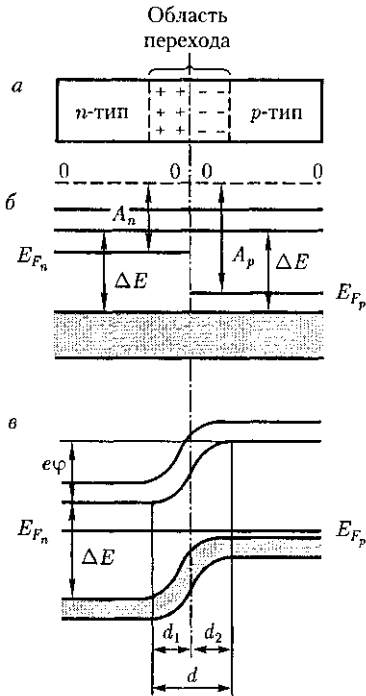


Рис. 339

$e\phi$,
 d p - n -перехода

$10^{-6} - 10^{-7}$,

(. 340,).

p n

(. 340,),

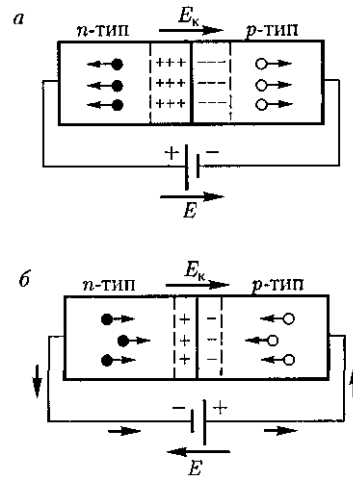


Рис. 340

. 341).

(. 340, б),

()

р п

(. . 340,) и *p-n*-перехода

р п

n-по-

f)).

, р п (

p-n-переход

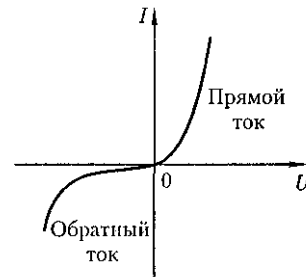
)) f

),

. 341

p-n-перехода.

()



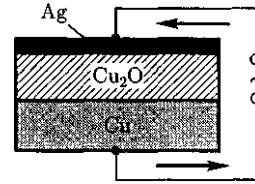
.341

р п (. . 340,).

(,)

. 341).

p-n-пере-



.343

§ 250.

()

()

ДЛИН ВОЛН.

) (

(. 343.)

Cu_2O ,

— (§ 105).

Cu_2O ,

p-n-переход,

)

Cu_2O ,

Ag

(. 342),

1

2

Cu_2O (→).

§ 249 (. . 338).

1 Ge

германия,

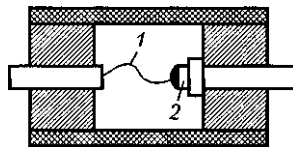
p-проводимостью.

p-n-переход,

(

ГОТОВНОСТЬ

.342



(от -70 до +120 °).

p-n-Переходы

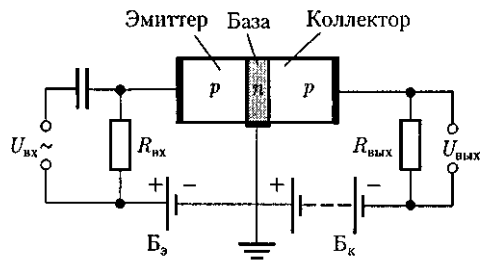


Рис. 344

Шокли;
1956 г.).

$R_{вх}$

$R_{вых}$

ДЫ

50 — 80 °).

$p-n-p$, . . .

(. 344).

$p-n$ -переходов,

$U_{вх}$ $B_к$ $R_{вых} \gg R_{вх}$,
 $U_{вх}$ (10 000).

$R_{вых}$

- направление ?
- ?
- ()

31.1. 0,72 , , 0 17° . возрастет . [2,45]

31.2. Д. . , .

31.3. , примесном .

32

§ 251.

Ze , Z —
 α -частиц
 (§ 208),
 $Z = 1$ $Z = 110$.
 $\frac{4}{2}X$, где X —
 Z —
 $10^{-14} - 10^{-15}$ (10^{-10}).
 протонно-нейтронная
 протонно-электрон-
 (протонно-нейтронная
 (1904 1994),
),
 ()
 , равный
 $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \approx 1836 m_e$
 m_e — () —
 $m_n =$
 $= 1,6749 \cdot 10^{-27} \approx 1839 m_e$.
 (*nucleus* —).
 (§ 215). результате
 протонно-электронном

($\approx 10^{17} / \text{м}^3$).

§ 252.

связь.

Ядра Z ,
 $(N = A - Z)$
 , различными Z —
 , $(Z = 1)$
 $N = 0$, ${}^2_1\text{H}$ — $(Z = 1, N = 1)$,
 ${}^3_1\text{H}$ — $(Z = 1, N = 2)$, —

(§ 40)

${}^{10}_4\text{Be}, {}^{10}_5\text{B}, {}^{10}_6\text{C}$.
 2500],
 Z ,

, причем

$$R = R_0 A^{1/3}, \quad (251.1)$$

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] c^2, \quad (252.1)$$

где $R_0 = (1,3 - 1,7) 10^{-15}$ м.

$m_p, m_n, m_{\text{я}}$ —

(251.1)

$m_{\text{я}}$

$$E_{\text{св}} = [Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - m]c^2, \quad (252.2)$$

$$\frac{m_{\text{H}} - m_{\text{e}}}{m_{\text{H}}} = \frac{m_{\text{p}} - m_{\text{e}}}{m_{\text{p}}} \approx \frac{1}{1836} \approx 5.4 \cdot 10^{-4} \quad (252.1)$$

$$\Delta m = [Zm_{\text{p}} + (A - Z)m_{\text{n}}] - m_{\text{я}}$$

кулоновского

ривают

$$\delta E_{\text{св}} =$$

: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126.

()

$\delta E_{\text{св}}$,
энергия

(. 345).

(≤ 12)

6-7

(${}^4_2\text{He}$ —

7,1 , ${}^2_1\text{H} \delta E_{\text{св}} = 1,1$, ${}^6_3\text{Li} - 5,3$)

(${}^4_2\text{He}$ ${}^{16}_8\text{O}$ ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ${}^{48}_{24}\text{Cr}$ ${}^{208}_{82}\text{Pb}$)
рис. 345

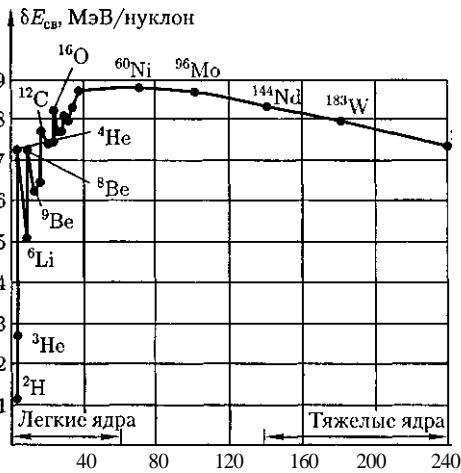


Рис. 345

: 1)
; 2)

друг

§ 253.

(1924) {

{

— — {

(

).

векторную

$$L_{я} = \hbar \sqrt{I(I+1)},$$

I —
(

),

$$0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, \dots$$

I,

СПИНОВЫМ

(

—

).

$p_{мя}$.

[(131.5)

$$]: p_{мя} = g_{я} L_{я}, \quad g_{я} —$$

, ТОЧНОСТЬ ЭТО-

(

$$\mu_{я} = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,0508 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}, (253.1)$$

$m_p —$

[

(§ 131)].

m

$$— \approx 1836$$

ОСНОВНОМ

(§ 223)

1)

2)

коротко-

10^{-15}

$p_{\text{тя}}$

100

()

3)

$0,1 \mu\text{я}$

$10^{-3} - 10$ ($p_{\text{тя}}$)

4)

§ 254.

5)

6)

приближен-

2.
1950;
(1906—1975)
Х.Иенсен (1907 1973)].

[1949—

по

(),

иоболочечную.

1.

(1936;

).

()
(§ 252).

) состоянии.

числа

[(251.1)],

§255.

(1852 1908) 1896 .
солей

НЕИЗВЕСТНОЙ

1934) — (1867—
(1856 1906)

: ,β γ-излучение.

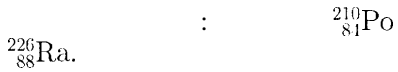
α-Излучение

(,)

(, 0,05).

α-Излучение

; α-частицы +2e,



$^4_2\text{He.}$ α-частиц

удельными $\frac{v}{c}$,

β-Излучение

меньше (),

(2),
β-Излучение

$$N=N_0e^{-\mu x}, \quad N_0 \text{ и } N—$$

, μ —
β-Излучение

μ

β -излучение
 γ -Излучение

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

5),

γ -Излучение

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (256.2)$$

$\lambda < 10^{-10}$

$$N_0 - \text{ (} t = 0 \text{); } N - \text{ нераспавшихся } t.$$

$$(256.2)$$

— γ -квантов ().

§ 256.

по

превращение

$T_{1/2}$

$T_{1/2}$ —

(256.2),

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

друга,
 $dN,$

$t = i + dt,$
 dt и N нераспавшихся к t :

$$dN \text{ ядер } (dN) = \lambda N dt.$$

$$dN = \lambda N dt, \quad (256.1)$$

$$t (\dots 0) N_0,$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt = \dots$$

(256.2).

$$\dots$$

(256.4)

(256.5)

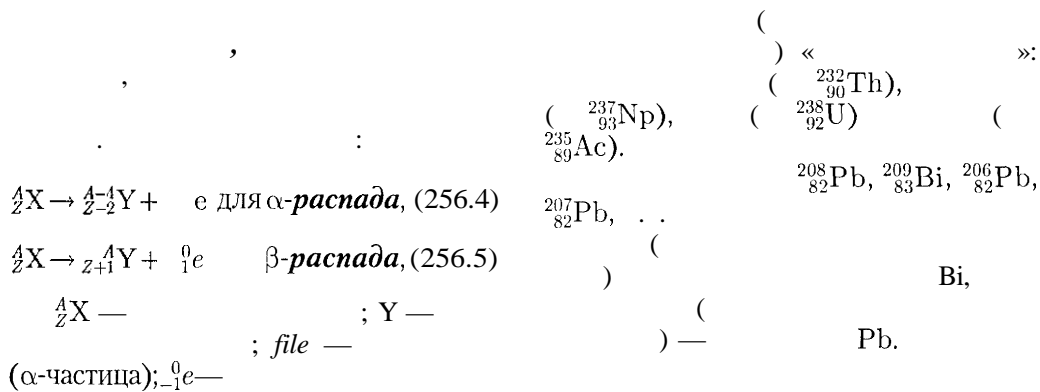
α-распада

β-распада

$$\dots = \frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (256.3)$$

рель() : 1 Б —

— () : 1 = 3,7 • 10¹⁰



§ 257.

α-активных

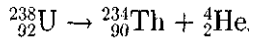
{ > 200, Z > 82}.

α-активных
 = 140—160
 (земли). α-Распад
 (256.4).

$$X = \frac{m}{m}, \quad (257.1),$$

α-распада
 ^{238}U

Th:



()

$$2 \cdot 10^7 / 4 \cdot 8,8$$

$$1,4 \cdot 10^7$$

)

8,8

», . . .

8,8

4,2

$T_{1/2}$

(1912)¹,

—*Нэтто*—

(§ 221) —

R_α

()

\:

$$\ln \lambda = A + B \ln R_\alpha, \quad (257.1)$$

¹ (1890—1958)
 ; (1882—1945) —

α-частиц.

и

α-части-

β⁻-распада.

β⁻-распада.

Протонно-нейтронное

(. . . 301, a)

(221.7):

$$D = D_0 \exp\left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_\alpha(U - E)} l\right].$$

D

(
(U)
α-частицы.

(3~
. 346).

β⁻-ак-

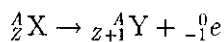
Гейгера — Нэттола [. (257.1)].

E_{\max} ?

§ 258. β⁻-Распад.

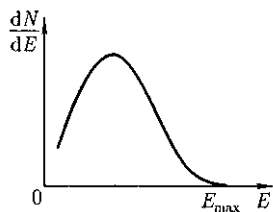
β⁻-распада (β⁺-рас-

(256.5)



E_{\max}

Рис. 346



$< E_{\max}$, бы

статистический

для

500

β^- -рас-

10^{18} !),

(3"

(
)

\hbar

величи-

у 2

(1931)

β^- -распаде

β^- -распа-

β^- -распаде

$1/2 (< 10^{-4} m_e)$ и

${}^0_0\nu_e$ β^- -распаде

${}^0_0\tilde{\nu}_e$.

β^- -распада (1934),

20 (1956).

« »

E_{\max} .

. 346,
 E_{\max}

β^- E_{\max} (0,782) равной
 β-электрон § 259.
 β⁻-распаде, а Z γ-излучение (§ 255)
 [(256.5)], β-распа-
 β⁻-активного
 : γ-Спектр
 . γ-Спектр —
 ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e + {}^0_0\bar{\nu}_e$ (258.1) (γ-квантов β-спектра
 § 258). γ-спектра
 , γ-излучение
 ()
 , 0,782 ,
 ; $10^{-13} - 10^{-14}$,
 (10^{-8}),
 γ-излучения.
 , ра-
 (. . .). , γ-излучение
 , 1950 . β⁻-распа-
 , γ-квантов,
 гой .
 , γ-излучении и Z
 ,
 (258.1). γ-Излучение
 . 346,

γ-излучение — γ-квантов.

10 γ-квант 5 γ-квантов

γ-кванта,

$$I = I_0 e^{-\mu x} (I_0 \text{ и } / -$$

γ-излучения

(γ-квант

$x; \mu$ —

γ-излучение —

μ

γ-излучением. γ-квантов.

γ-Кванты,

как

квантовой

γ-излучения

γ-кванта,

$$\nu = h\nu \text{ из}$$

(комптоновское, комpton-эф-
-позитронных)

$-A_L, \dots, A_K, A_L, \dots - A_K, -$
, ... L-оболочек.

γ-излучения, —

γ-квант

β-электронов,
(§ 258).

γ-квантов ($E_\gamma \leq 100$).

γ-Кванты,

γ-квант,

γ

($E_\gamma \approx 0,5 \text{ МэВ}$) γ -квант — $(\text{Гр})^1: 1 = 1 / \text{—}$

γ -квантов 1 Дж.

(§ 206).
 $E_\gamma > 1,02$
 $) = 2m_e c^2 (m_e -$

$E_\gamma \propto Z^2$ $E_\gamma \approx 10$ — $(/);$

γ -излучения $() : 1 = 2,58 \cdot 10^{-4} /$ является
электронно-позитрон-

ных γ -кванта (7—

8),
 γ -кванта $() : 1$ —

γ -излучения в 1 Р (1 бэр = 10^{-2} Дж/кг). γ -излучения

γ -излучения при **1)** [

(, трещинный . .) — $(/); 2)$
 $(/)$].

γ -излучения (**§ 260.**
 γ -излучения(²⁾

γ -излучения

величина,

¹ (1666—1736)—
² (. 1929) —

(215.5),

γ -КВАНТОВ

$At \approx \frac{1}{\lambda}$,
 $At -$

$At, \Delta E$

γ -КВАНТ

E_γ

$= 0$

$$E_\gamma = E - E_\gamma$$

($At \rightarrow \infty$).
квантово-механической

$E_\gamma -$

(,),

()

γ -КВАНТ

10^{-13}

$$E'_\gamma = E + E_\gamma$$

1^{-2}

$E_\gamma -$
 γ -КВАНТ

γ -излучения,

(рис.347).

$2E_\gamma$

γ -излуче-

γ -кванта

γ -излучения

$$E_\gamma = \frac{p_\gamma^2}{2m_\gamma} = \frac{p_\gamma^2}{2m_\gamma} =$$

§ 259)

(

$$= \frac{E_\gamma^2}{2m_\gamma c^2} \approx \frac{E^2}{2m_\gamma c^2}. \quad (260.1)$$

γ -квантами

$^{191}_{77}\text{Ir}$

ОСНОВНОГО
ядра,

Место
 γ -излучения
 γ -КВАНТ

:

γ -кванта
возбужденно-

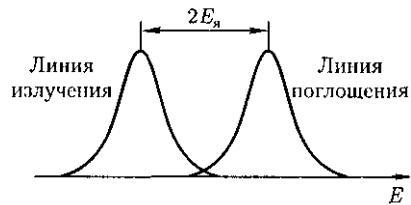


Рис.347

129 , 10^{10} ,
 $\approx 4 \cdot 10^{-5}$.

(260.1),
 $5 \cdot 10^{-2}$, . . .

(наблюдения

).

γ -излу-

$^{191}_{77}\text{Ir}$ («
»),
20
(^{57}Fe , ^{67}Zn).
. Мёссбауэр

()

$$r^2 = 10^{-15} - 10^{-17},$$

1958 . . . («
1961 .). γ -лучения

γ -линий,

(. . . при

Внешнее расщепление (,

).

)

(не) γ -квант,

(260.1)

(1960)

γ -излучения

», «

).

§261.

) γ -квантов

Мёссбау .

(, (3, γ)

γ -излучения

§ 105),

, γ -кванты

сцинтилляторов

(ZnS α -частиц; NaI—Tl, CsI—Tl — β -частиц γ -квантов)

γ -квантов)

Сцинтилляционные

(10^{-10} — 10^{-5}),

, сцинтиллято-

1)

10^{-8} — 10^{-10}).

зарегистрированных

(сцин-
тилляционный счетчик,
ионизационная
счетчик,
);

100 %
30 % γ -квантов.

(NaI—Tl, CsI—Tl,

2)

сцинтилляторах

тиц.

2.

1.

решкова—

§ 189.

на

(1903)
 α -частицы.

являются сцинтил-
(кристаллофосфор) (§ 245)

[(189.1)],

¹ (1832—1919)
химик.

, если

са , ,).

4. , .

, () , () .

, ($10^{-3}-10^{-5}$.

1 , .

10^{-9} . [(. § 106), . .

3. —] *Гейгера—Мюлле-*
 ' [В (. § 107), . .

].

, выбирается ,

, ,

, подбирается , , . .

, , частицу,

рекомбинировать, —

, 10^3-10^4 (, 10^6).

,

: ,

() ,

, (. § 107),

(

1 . . (1911—1977)—немецкий

первичной
— Мюллера

расположен и

10^8 .

типе

(, α -час-
той

β -частица—), энергии
(),

(
) ,
реакции

$10^{-3}-10^{-7}$.

(1892 — 1990)

100 %

5 %

γ -квантов.

(1927).

5.

(. § 250).

10^{-9} .

(), по

высоких энер-

6.

¹ (1912) —

1 %

(50 — 60)

(

7.

(1936) —

веществом

(10°)

(-60°)

¹

(1869 — 1959) — английский

щиной 5 ,

ВИЛЬСОНОВСКОЙ

4 МПа,

0,05
1

8. [1952;
(. 1926)].

(
)
(
).

фото-

(1957)

(
2),
2—3
жидкости

9. [1927;
Л. . МЫСОВСКИЙ
(1888—1939)] —

§ 262.

цепочки

γ-квантами)

$X + a \rightarrow Y + b$, или $X(a, b) Y$,
 $X \rightarrow Y + a$ или $X \rightarrow Y + a + b$,
 (1936)

$$X + a \rightarrow C \rightarrow Y + b. \quad (262.1)$$

$2 \cdot 10^{-15}$

$$\sigma = \frac{dN}{nNdx}$$

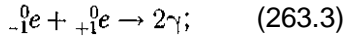
n ядер; dv — α -частица

$$= 28 \cdot 10^{-28}$$

$$\begin{aligned}
 & (d \approx 10^{-15}) \\
 & v \approx 10^7 / \text{с} \\
 & = \frac{10^{-15} \text{ м}}{10^7 / \text{с}} = 10^{-22} \text{ с}^2
 \end{aligned}$$

$$10^{-12} \dots (10^6 - 10^{10}) \tau. \quad 10^{-16}$$

1937 .).



электронно-позитронная
γ-кванта,

(
β-распада)
β±-распадов,

γ-квантов

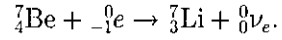
(263.3)

${}^7_4\text{Be}$

${}^7_3\text{Li}$:

мовича (1909—1973).
(263.3)—процессы
превращения

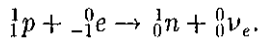
(263.2)



§264.

(263.1),

(K, L . . .),

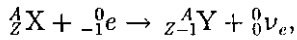


(. § 267).

(1891—1957)

1930 .,

, α-частицами,



γ-лучи
(

7

).

(
, 1931 .)

γ -КВАНТЫ

7 ! 50

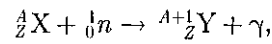
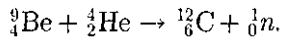
(1891 — 1974)
(1932),

γ -КВАНТЫ,

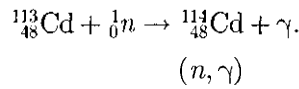
(n, γ) .

[(,)]

[(n, γ)]

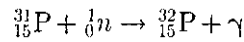


(${}^7_3\text{Li}$,) ${}^{10}_5\text{B}$ ${}^{11}_5\text{B}$ (,) ${}^{14}_7\text{N}$).



() .

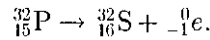
, β^- -рас-



${}^{32}_{15}\text{P}$,

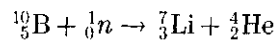
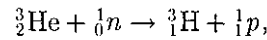
β^- -распад

10^{-4} (10^{-7}), (10^{-7} — 10^{-3}),
(10^{-3} — **0,5**)
($0,5$ — 10^4)



10^8), (10^4 — 10^8 — 10^{10}) и ($\geq 10^{10}$)

α -частиц ():



).

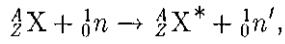
) или

${}^6_3\text{Li} + {}^1_0n \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$
сманна (1902—1980) (),
(1904—1979) (),
(1878—1968) (),
(1913—1990), К.А.
 § 268). () и (), . . . () —

— реакциям ядра,

α-ча-

β⁻-активных



${}^1_0n'$,

${}^1_0n'$
 1_0n ,

(— ≈ 1),

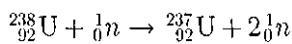
),

($\frac{z}{z'} \approx 1,6$),

γ-кванта.

10

($n, 2n$).

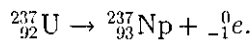


β⁻-активный

${}^{237}_{92}\text{U}$,

β⁻-превращений,

γ-квантов.



β⁻-распад

[(258.1)],

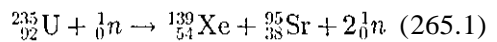
β⁻-превращений

§ 265.

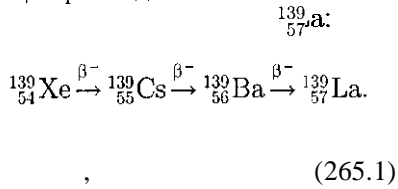
40

— (1901—1954) (), (1879—1968), . . .

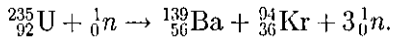
${}^{235}_{92}\text{U}$



β^- -распада $^{139}_{54}\text{Xe}$



$^{235}_{92}\text{U}$.



(§ 264)

($t \leq 10^{-14}$), (0,7%)

$0,05 \leq t \leq 60$).

2,5

7

2

7,6 (§ 252).

1,1

(),

(§ 254).

(> 210).

$^{238}_{92}\text{U}$,

$^{232}_{90}\text{Th}$,
 $^{239}_{94}\text{Pu}$.

$^{231}_{91}\text{Pa}$

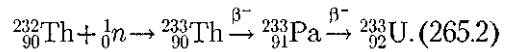
$^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$ $^{233}_{92}\text{U}$, $^{230}_{90}\text{Th}$ (

).

[(n, γ), § 264]

$^{232}_{90}\text{Th}$:

8,7



§ 266.

, которые

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T} \quad (266.1)$$

(266.1),

$k \geq 1$.

$$N = N_0 e^{\frac{(k-1)t}{T}},$$

N_0 —

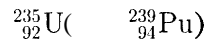
, N —
 t ; N определяется

() > 1

$= 1$

< 1

И



, N —

§267).

kN ,

поколение $dN = kN - N = N(k-1)$.

(${}_{92}^{235}\text{U}$:

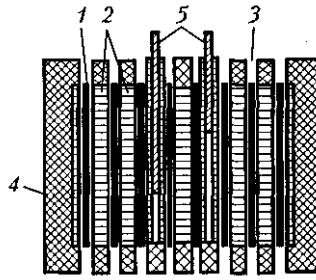
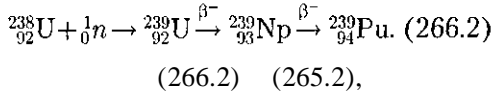
0,7 %)
 $({}_{90}^{232}\text{Th} \quad {}_{92}^{238}\text{U}$:

ТОПЛИ-

99,3 %) $^{232}_{90}\text{Th}$

(265.2)], а $^{238}_{92}\text{U}$,

β^- -распадов —
 $^{239}_{94}\text{Pu}$:



. 348

§ 267.

(1942)

() — (1946)

(. 348).

2,

I
замедляют-

()

(. § 265),

1 .

(3 —

(10^{11} , γ -излучение), (266.2). (265.2)

— ($^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$),
 1) (1954)

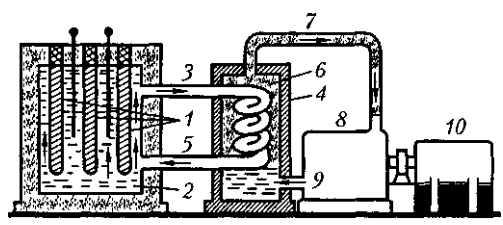
); $^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{233}_{92}\text{U}$,
 $^{238}_{92}\text{U}$, $^{232}_{90}\text{Th}$, . 349. I

2) CO_2 (300 °)

3) 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

4) 10,

5) (



, графито-газовые . 349

«

» —

§ 268.

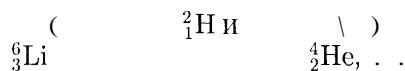
(, 1500 , МО-

1000)

(750 — 1500),
специфических

(. . 345)

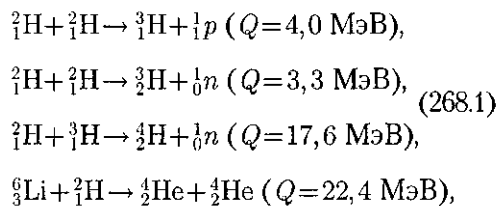
(« »),



(
 ${}^{49}_{40}\text{K}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, $\rightarrow 0,8$).

(*бридиров*),

— , что по-



$3 \cdot {}^{238}_{92}\text{U}$, 1
 $12 \cdot {}^{232}_{90}\text{Th}$ (

$5 \cdot 10^8$) , . . .
 10^9)

Q —

350

${}^{238}_{92}\text{U}$
200

0,84

(268.1)
 $\frac{17,6}{\kappa} \approx 3,5$

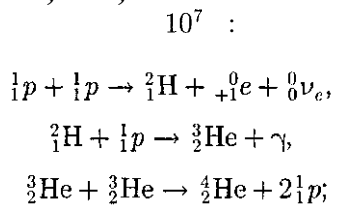
${}^2_1\text{H}$
 $2 \cdot 10^{-15}$
 $4\pi \epsilon_0 r^2 \approx 0,7$

$0,35$
 $2,6 \cdot 10^9$
 $1,3 \cdot 10^7$

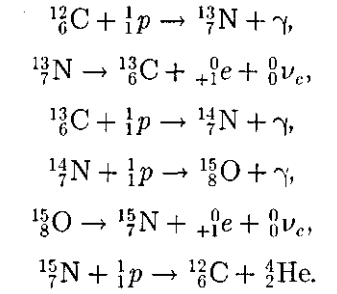
10^7
 : 1)
 ; 2)
 (§ 221).

10^7),
 , одним из источников

1) протонно-протонный,



2)
 ($2 \cdot 10^7$):



$26,7$
 « »
 60

(1953),
 ()
 ()

— «
 »

10⁸ . *сона*¹ — 10¹⁴ (7-8) • 10⁶ / 3 5 М³,
 , а —

10⁸ . *сона*¹ — 20 по (« »:
 (. § 108), 10 по 10,
 (, 20),

« ».
 « » ,
 () . . .

1975 . 4 • 10¹³ ,
 10¹⁷ • .
 «Токамак-10» (Т-10).
 Т-10, —

- « » N свободных (?) .
- ?
- ?
- ?
- ?
- ?
- () ?
- α-распад ?
- элемента ?
- α-распадов ?
- α-распада (3~ ?

Дж. Лоусон (. 1923) —

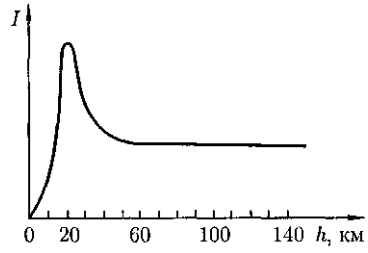
- β -частиц?
- γ -кванта?
- γ -излучения ?
- ? (α -частиц,) ?
- ? ? () β^\pm -распадах?
- ? ? β^\pm -распадов?
- ? ? ?
- ? ${}^{238}_{92}\text{U}$ ${}^{239}_{94}\text{Pu}$?
- ? , : 1) > 1 ; 2) $= 1$; 3) < 1 ?
- ? ? ?
- ? ? ?

- 32.1. $19,9272 \cdot 10^{-27}$. [7,7 /] ${}^{12}_6\text{C}$,
- 32.2. , (%) t ,
 . [5 %]
- 32.3. $1/4$. [10,5] 24 . ,
- 32.4. . [18,4] $1 + 2 \rightarrow 1 + 2 \text{ He}$?
- 32.5. $\gamma \rightarrow {}^0_{-1}e + {}^0_{+1}e$
- 2,02 . [1]
- 32.8. = 90 мс.
 $k = 1,003$, . [= $\frac{1}{k-1} = 30$] ,

Глава 33

§ 269.

(§ 261),
 $h \approx 50$
 (. 350).



энергии.
 90 %
 $10^9 - 10^{13}$
 7% — α -частицы
 (1 %)
 ($Z > 20$).

() ()

γ -кванты $> 2m_e c^2$,

(§ 263).

(. 350)

$h \geq 50$

γ -кванты,

но-позитронных

γ -квантов

$2m_e c^2$ (. 351).

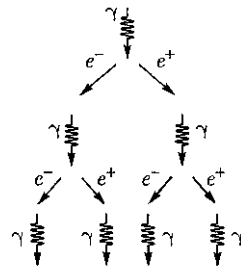
ИНТЕНСИВ-

электронно-позит-
ронно-фотонным ()

Рис. 351

$h < 20$

h



— , , γ -кванты— (1936) , , (207 m_e).
мюонами.
 (. § 270). , ,
 , , , ,
 , (π^- K-мезонов).

— 10^{21} ,
 . 50 . XX . (μ^+)
 (μ^-) ;
 ; . § 116),
) 206,8 m_e , μ^+ -
 μ^- -мюонов $2,2 \cdot 10^{-6}$.
 ЛИШЬ ОСНОВНЫМ «ИСТОЧНИКОМ»

§ 270.

X. (1907— (.
 1981), § 254)
 1935 . , 200—300
 , , явля-
 , ,
 (1913—1993)
 (1962)
 (. 1922),
 $\bar{\nu}_e$ $\bar{\nu}_e$ — «электронных»
 ,

(1947),

(§ 263, 258).
 $\bar{\nu}_\mu$ и $\bar{\nu}_\mu^0$

— греч. « π -мезоны (

(270.1) (270.2)

,
ницах \hbar), $1/2$ (в еди-
(-1/2) (1/2)

Be,
 α -частицами, 300 МэВ. π -Мезоны

ядерно-неактивными

(π^+),
(π^-) (π^0). π^+ - π^- -мезонов
273,1 m_e , π^0 -мезона
264,1 m_e .

, а другой —

π -мезонов
 $2,6 \cdot 10^{-8}$ $0,8 \cdot 10^{-16}$.

X.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu, \quad (271.1)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu, \quad (271.2)$$

дальнейший

том, что дол-

(270.1) (270.2).

(271.1) (271.2)

π -мезонов
(\hbar),

π -мезо-

π -мезон.

γ -кванта:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

§ 271.

С. Пауэлл (1903 — 1969;

π^0 -мезона,
 π^+ -мезона,

(1949)

970 m_e .

(K^+),
 (\sim) K -мезонов $(K^0 \ K^0)$.
 $10^{-8} - 10^{-10}$

K -мезонов.

K -мезо-

$$\begin{cases} K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu; & K^- \rightarrow \mu^- + \tilde{\nu}_\mu, \\ K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0; & K^- \rightarrow \pi^- + \pi^0, \\ K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e; & K^- \rightarrow e^- + \pi^0 + \tilde{\nu}_e. \end{cases}$$

K -мезонов

():

(K_s^0)

$$\begin{cases} K_s^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-, \\ K_s^0 \rightarrow \pi^0 + \pi^0; \end{cases}$$

(K_L^0)

$$\begin{aligned} K_L^0 &\rightarrow \pi^+ + e^- + \tilde{\nu}_e; & K_L^0 &\rightarrow \pi^- + \mu^+ + \nu_\mu, \\ K_L^0 &\rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e; & K_L^0 &\rightarrow \pi^0 + \pi^0 + \pi^0, \\ K_L^0 &\rightarrow \pi^+ + \mu^- + \tilde{\nu}_\mu; & K_L^0 &\rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0. \end{aligned}$$

(μ -распад), (β -распад,

($\geq 10^{-10}$).

100
 10^{14}

§ 272.

, называемых

10^{-23} ; π^0 -мезона,

10^{-16} ;

$$10^{10} - 10^8$$

() π -мезо-

π -МЕЗОНОВ

$$10^{-19} \quad 10^{-15}$$

1)

2)

(«ЛЕПТОС» —

(π^+ , π^- , π^0), π -мезоны —
« »

1975 . ЛЕПТОН —

СИЛЬНОМ

$$3487 m_e$$

мульт-

типлетами.

3)

(« » —

$$I = 2I + 1$$

$$I = 1/2$$

), ИЗСПИН $I = 1$ ($n = 3$)

зарядовая

(§ 254),

, нейтрино антинейтрино

1956 .

§ 273.

1928 .

(. § 263),

(263.3)

$$(-1e + +1e \rightarrow 2\gamma).$$

(. . .).

π^0 -мезона),

$p-p$ -ПАРЫ
4,4

(1955)

(. . .),

(. . .),
- \tilde{p} .

1956 .

$$\tilde{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ + \pi^- + \pi^0, (273.1)$$

$$\tilde{p} + p \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^0 + \pi^0, (273.2)$$

$$\tilde{p} + n \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^- + \pi^0 + \pi^0. (273.3)$$

(1956)

рядки

$${}^0_0\bar{\nu}_e + {}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + {}^0_{+1}e. \quad (273.6)$$

$$\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n, \quad (273.4)$$

$$\bar{p} + p \rightarrow \bar{n} + n + \pi^-. \quad (273.5)$$

$${}^0_0\nu_e + {}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + {}^0_{-1}e. \quad (273.7)$$

(273.7)

(273.6)

β -распада,

$${}^1_0\bar{n} \rightarrow {}^1_{-1}\bar{p} + {}^0_{+1}e + {}^0_0\nu_e \text{ [ср. (258.1)].}$$

π^+ -мезона,
§ 274).

(

$\nu_\mu \nu_\mu$

,

ν_e, ν_μ

,

ν_e, ν_e

ν_μ, ν_μ

(§ 271),

$7 \cdot 10^{-19}$;

π^0 -ме-
 $1074m_e$,

π -МЕЗОНОВ γ -КВАНТОВ).

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \text{ (271.1)}$$

(273.7)

$${}^0_0\nu_\mu + {}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + \mu^-,$$

μ^- -МЮОНЫ.

$\nu_e \nu_\mu$.

—спиральностью,

β -распад

()).

(258.1),

],

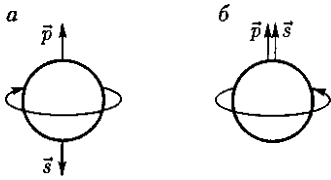


Рис. 352

спиральностью ().
 спиральностью ().
 спиральностью ().

§ 274.

§ 274)

β -распад. μ^- -мюону, μ^+ -мюону

. hyper —)

(Ω^-), (Σ^+ , Σ^-), (Ξ^+ , Ξ^-)

Ω^- -гиперона (1961)

(. 1929) (1969) ;

\bar{p} и \bar{n})—

1965 .

(1970)

(1973).

$3284m_e$.

S ,

$3273m_e$ Ω^-

$S = 1$,

$(2183-3273)m_e$,
 Ω^- -гиперона

$1/2$ ($3/2$),
 10^{-10} (

$S = 1$,
 π -МЕЗОНОВ $S =$

10^{-20}).

K^0 -МЕЗОНОМ,

(π -МЕЗОНЫ,
 γ -КВАНТЫ).

(274.2)

Ξ -Гиперонам,

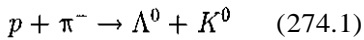
$S = -2$; Ω -гиперонам —

$S = -3$.

() , K^0 -мезон, Σ^0 -, Ξ^0 -гипероны,

10^{-23} , 10^{13} (!)

K -мезоном.

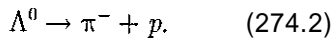


Λ^0 -гипероном

K^0 -ме-

$= +1$ (

$- -1$ (



K -мезонов

1955 .

К-мезонов
Т. Ли (1956 .; 1957 .)

четности,

1/2, (. § 226),
— Дирака (. § 235).

§ 275.

(лептонный) L .
 $L = +1$ ($\nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \nu_\tau$), $L = -1$
($e^+, \mu^+, \tau^+, \nu_e, \nu_\mu, \tilde{\nu}_\tau$) $L = 0$

§ 273,

L сформулировать
всех :

(258.1)

(263.1) —

μ^0 -мезонов,
пи-ноль-

π^{0-} , μ^0 -мезонами.

$L = +1$,
 $L = -1$,

. 13

(. § 272):

Таблица 13

Группа	Название частицы	Символ		Заряд, ед. e	Масса покоя, ед. m_e	Спин, ед. \hbar	Изоспин, I	Лептонное число, L	Барионное число, B	Странность, S	Приблизительное время жизни, с		
		частицы	античастицы										
Фотоны	Фотон	γ		0	0	1	—	0	0	0	Стабилен		
Лептоны	Электрон	e^-	e^+	1	1	$1/2$	—	+1	0	0	Стабилен		
	Электронное нейтрино	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	$1/2$	—	+1	0	0	Стабильно		
	Мюон	μ^-	μ^+	1	206,8	$1/2$	—	+1	0	0	$\approx 10^{-6}$		
	Мюонное нейтрино	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	$1/2$	—	+1	0	0	Стабильно		
	Тау-лептон	τ^-	τ^+	1	3487	$1/2$	—	+1	0	0	$\approx 10^{-12}$		
	Таонное нейтрино	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	0	0	$1/2$	—	+1	0	0	Стабильно		
Адроны	Мезоны	Пионы	π^0		0	264,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-16}$	
			π^+	π^-	1	273,1	0	1	0	0	0	$\approx 10^{-8}$	
		Каоны	K^0	\bar{K}^0	0	974,0	0	$1/2$	0	0	+1	$\approx 10^{-10} - 10^{-8}$	
			K^+	K^-	1	966,2	0	$1/2$	0	0	+1	$\approx 10^{-8}$	
		Эта-мезон	η^0		1	1074	0	—	0	0	0	$\approx 10^{-19}$	
	Барионы	Протон	p	\bar{p}	1	1836,2	$1/2$	$1/2$	0	+1	0	Стабилен	
		Нейтрон	n	\bar{n}	0	1838,7	$1/2$	$1/2$	0	+1	0	$\approx 10^3$	
		Гипероны: лямбда	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	0	2183	$1/2$	0	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
			Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	0	2334	$1/2$	1	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-20}$
			Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	1	2328	$1/2$	1	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
			Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	1	2343	$1/2$	1	0	0	+1	-1	$\approx 10^{-10}$
		кси	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	0	2573	$1/2$	$1/2$	0	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	1	2586	$1/2$	$1/2$	0	0	+1	-2	$\approx 10^{-10}$
омега	Ω^-		$\bar{\Omega}^-$	1	3273	$3/2$	0	0	+1	-3	$\approx 10^{-10}$		

, η -мезон, (),
 (. 13),].
),
 () . (= +1
 , η -мезон), (.
 « » — ;
) .
 $S = 0$.
 $S = +1$, (,
) — —1,
 — 0,
 : ,
 (1964)
 (. 1937)
 , « »
 барион. « » Дж.
 (273.1) — (273.5). « »
 Ω^- -гиперона $1/2$ () «
 $3/2$), . . Гелл-Манн — Цвей-
 S ,
 (. . 13). d, s (,
 d, s), (\bar{u} ,
 . 14 (,
 (. § 226),) . (,
 — Эйнштейна (. § 235).)
 η -мезоны $S = +1$,
 $S = 0$.
 $1/2$, « »
 (« »),
 ((

Кварк	Символ кварка (антикварка)	Электрический заряд [e]	Барнионное число B	Спин [ħ]	Странность S
Верхний (up)	$u (\bar{u})$	$+2/3 (-2/3)$	$+1/3 (-1/3)$	$1/2$	0
Нижний (down)	$d (\bar{d})$	$-1/3 (+1/3)$	$+1/3 (-1/3)$	$1/2$	0
Очарованный (charm)	$c (\bar{c})$	$+2/3 (-2/3)$	$+1/3 (-1/3)$	$1/2$	-1 (+1)
Странный (strange)	$s (\bar{s})$	$-1/3 (+1/3)$	$+1/3 (-1/3)$	$1/2$	-1 (+1)
Истинный (truth)	$t (\bar{t})$	$+2/3 (-2/3)$	$+1/3 (-1/3)$	$1/2$	0
Прелестный (beauty)	$b (\bar{b})$	$-1/3 (+1/3)$	$+1/3 (-1/3)$	$1/2$	0

: « **НОВОИ** » (charm).
 (, — ,
). , , π^+
 ud , π^- —
 ud , K^+ — $d\bar{s}$, — uud ,
 — udd , Σ^+ -гиперон — uus , Σ^0 -гипе-
 — uds . . J/Ψ -мезона.
 . 14.
 [J/Ψ
 Ω^- -гиперон, cc . cc
 (sss),
 ; § 127];
 () , (,
) .
 : « », «
 » « ». « »,
 . , $1/2$,
 — , 1974 . ()
 (J/Ψ) $6000m_e$,
 10^{-20} , ,
 , Ω^- -гиперон.

33.1.
3

2,2

100 . [19,8]

33.2.

γ -кванта: $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$.

$264,1 m_e$,

γ -квантов. [67,7]

33.3.

γ -кванта,

γ -квантов,

γ -квантов.

рона и

33.4.

: 1) $\sim \rightarrow \mu^- + \nu_\mu$; 2) $K^+ \rightarrow e^+ + \pi^0 + \nu_e$.

33.5.

: 1) $+ \pi^- \rightarrow \xi + K^-$; 2) $+ \pi^- \rightarrow \sim + K^{++}$.

33.6.

: 1) $\pi^- + \rightarrow \Lambda^0 + K^-$; 2) $+ \rightarrow + \pi^+$.

1.

$$\langle \vec{v} \rangle = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}.$$

$$\langle \vec{a} \rangle = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

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

$$a_\tau = \frac{dv}{dt}.$$

$$a_n = \frac{v^2}{r}.$$

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n;$$

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

$$\begin{cases} v = v_0 \pm at, \\ s = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \end{cases}$$

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}.$$

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 \pm \varepsilon t, \\ \varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}. \end{cases}$$

$$\begin{aligned} s &= R\varphi, & v &= R\omega; \\ a_\tau &= R\varepsilon, & a_n &= \omega^2 R. \end{aligned}$$

()

ускорения

$$\vec{F} = m\vec{a} = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

трения

) (

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const.}$$

1—2

$$A = \int_1^2 F \cos \alpha ds.$$

$$N = \frac{dA}{dt} = \vec{F} \vec{v}.$$

$$T = \frac{mv^2}{2}.$$

энергия ,

$$\Pi = mgh.$$

мированного

$$\Pi = \frac{kx^2}{2}.$$

$$E = T + \Pi.$$

()

$$T + \Pi = E = \text{const.}$$

С

m_1 и m_2

$$v_1' = \frac{(m_1 - m_2)v_1 + 2m_2v_2}{m_1 + m_2},$$

$$v_2' = \frac{(m_2 - m_1)v_2 + 2m_1v_1}{m_1 + m_2}.$$

$$\vec{v} = \frac{m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2}{m_1 + m_2}.$$

()

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

()

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

,

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

м

сительно

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

$$J = \frac{1}{3}ml^2.$$

Теорема

$$J = J_C + ma^2.$$

$$T_{\text{вр}} = \frac{J_z \omega^2}{2}.$$

Момент

ной

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

неподвиж-

ной оси

$$\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}]_z.$$

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

$$L_z = \sum_{i=1}^n m_i v_i r_i = J_z \omega.$$

движения

$$M_z = J_z \varepsilon; \quad \vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}.$$

Закон

(для

$$\vec{L} = \text{const.}$$

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

$$\vec{P} = m\vec{g}.$$

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}.$$

$$\varphi = \frac{\Pi}{m} = -G \frac{M}{R}.$$

$$\vec{g} = -\text{grad} \varphi.$$

Уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости

$$Sv = \text{const.}$$

Уравнение Бернулли

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

Релятивистское замедление хода часов

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Релятивистское (лоренцево) сокращение длины стержня

$$l'_0 = \frac{l}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Релятивистский закон сложения скоростей

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'}, \quad u' = \frac{u - v}{1 - \frac{v}{c^2} u}.$$

Релятивистский импульс

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}.$$

Полная энергия свободной частицы

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

Энергия покоя

$$E_0 = mc^2.$$

Связь между полной энергией и импульсом релятивистской частицы

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2}.$$

2. Основы молекулярной физики и термодинамики

Закон Бойля – Мариотта

$$pV = \text{const при } T, m = \text{const.}$$

Законы Гей-Люссака

$$V = V_0(1 + \alpha t) \text{ при } p = \text{const, } m = \text{const,}$$

$$p = p_0(1 + \alpha t) \text{ при } V = \text{const, } m = \text{const.}$$

Закон Дальтона

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n.$$

Уравнение Клапейрона – Менделеева для произвольной массы газа

$$pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT.$$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2.$$

Средняя квадратичная скорость молекулы

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Средняя арифметическая скорость молекулы

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}.$$

Наиболее вероятная скорость молекулы

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}.$$

Барометрическая формула

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}.$$

Средняя длина свободного пробега молекул

$$\langle l \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}.$$

Среднее число столкновений молекулы за 1 с

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

Закон теплопроводности Фурье

$$j_E = -\lambda \frac{dT}{dx}.$$

Теплопроводность (коэффициент)

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

Закон диффузии Фика

$$j_m = -D \frac{dp}{dx}.$$

Диффузия (коэффициент)

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

Закон Ньютона для внутреннего трения (вязкости)

$$j_p = -\eta \frac{dv}{dx}.$$

Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

Средняя энергия молекулы

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{kT}{2}.$$

Внутренняя энергия произвольной массы газа

$$U = \nu \frac{i}{2} RT = \frac{m}{M} \frac{i}{2} RT.$$

Первое начало термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A.$$

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме

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

Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении

$$C_p = \frac{i+2}{2} R.$$

Работа газа при изменении его объема

$$\delta A = p dV.$$

Работа газа при изобарном расширении

$$A = p(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R(T_2 - T_1).$$

Работа газа при изотермическом расширении

$$A = Q = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Уравнения адиабатного процесса (уравнение Пуассона)

$$pV^\gamma = \text{const}, TV^{\gamma-1} = \text{const}, T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const}.$$

Работа газа при адиабатном расширении

$$A = \frac{m}{M} C_V (T_1 - T_2) = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right].$$

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$

Термический коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса для 1 моль реального газа

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = RT.$$

3. Электричество и электромагнетизм

Закон Кулона

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}.$$

Напряженность электростатического поля

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0}.$$

Поток вектора напряженности электростатического поля сквозь замкнутую поверхность S

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS.$$

Принцип суперпозиции

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

Электрический момент диполя

$$\vec{p} = |Q| \vec{l}.$$

Теорема Гаусса для электростатического поля в вакууме

$$\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i.$$

Объемная, поверхностная и линейная плотности заряда

$$\rho = \frac{dQ}{dV}; \quad \sigma = \frac{dQ}{dS}; \quad \tau = \frac{dQ}{dl}.$$

Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью,

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

Напряженность поля, создаваемого двумя бесконечными параллельными разноименно заряженными плоскостями,

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (r \geq R); \quad E = 0 \quad (r < R).$$

Напряженность поля, создаваемого объемно заряженным шаром,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (r \geq R),$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R^3} r' \quad (r' \leq R).$$

Напряженность поля, создаваемого равномерно заряженным бесконечным цилиндром,

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\tau}{r} \quad (r \geq R), \quad E = 0 \quad (r < R).$$

Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль замкнутого контура L

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_i dl = 0.$$

Потенциал электростатического поля

$$\varphi = \frac{U}{Q_0} = \frac{A_\infty}{Q_0}.$$

Связь между потенциалом электростатического поля и его напряженностью

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad \text{или} \quad \vec{E} = -\nabla \varphi.$$

Поляризованность

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i.$$

Связь между векторами \vec{P} и \vec{E}

$$\vec{P} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}.$$

Связь между диэлектрической проницаемостью среды ϵ и диэлектрической восприимчивостью вещества α

$$\epsilon = 1 + \alpha.$$

Связь между векторами электрического смещения и напряженностью электростатического поля

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E}.$$

Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

Электрическая емкость уединенного проводника

$$C = \frac{Q}{\varphi}.$$

Электрическая емкость шара

$$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon R.$$

Электрическая емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}.$$

Электрическая емкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

Электрическая емкость сферического конденсатора

$$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

Электрическая емкость параллельно соединенных конденсаторов

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

Электрическая емкость последовательно соединенных конденсаторов

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

Энергия заряженного уединенного проводника

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C}.$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{Q\Delta\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C}.$$

Объемная плотность энергии электростатического поля

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2}.$$

Сила тока

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Плотность тока

$$j = \frac{I}{S}.$$

Электродвижущая сила, действующая в цепи,

$$\mathcal{E} = \frac{A}{Q_0}; \quad \mathcal{E} = \oint \vec{E}_{ct} d\vec{l}.$$

Закон Ома для однородного участка цепи

$$I = \frac{U}{R}.$$

Закон Ома в дифференциальной форме

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}.$$

Мощность тока

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Закон Джоуля — Ленца

$$dQ = IU dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt.$$

Закон Джоуля — Ленца в дифференциальной форме

$$w = jE = \gamma E^2.$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи (обобщенный закон Ома)

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R}.$$

Правила Кирхгофа

$$\sum_k I_k = 0; \quad \sum_i I_i R_i = \sum_k \mathcal{E}_k.$$

Коэффициент вторичной электронной эмиссии

$$\delta = \frac{n_2}{n_1}.$$

Магнитный момент рамки с током

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}.$$

Вращательный момент, действующий на рамку с током в магнитном поле,

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}.$$

Закон Био — Савара — Лапласа для элемента проводника с током

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Магнитная индукция поля прямого тока

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{R}.$$

Магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

Закон Ампера

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}].$$

Магнитное поле свободно движущегося заряда

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Сила Лоренца

$$\vec{F} = Q[\vec{v}, \vec{B}].$$

Холловская поперечная разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \frac{1}{en} \frac{IB}{d} = R \frac{IB}{d}.$$

Закон полного тока для магнитного поля в вакууме (теорема о циркуляции вектора \vec{B})

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k.$$

Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме), имеющего N витков,

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l}.$$

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) сквозь произвольную поверхность

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS.$$

Теорема Гаусса для поля с магнитной индукцией \vec{B}

$$\int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS = 0.$$

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$dA = I(d\Phi_2 - d\Phi_1).$$

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$dA = Id\Phi'.$$

Закон Фарадея

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}.$$

Индуктивность бесконечно длинного соленоида, имеющего N витков,

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}.$$

Ток при размыкании цепи

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Ток при замыкании цепи

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right).$$

Энергия магнитного поля, связанного с контуром,

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Объемная плотность энергии магнитного поля

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \sum \vec{p}_a.$$

Связь между векторами \vec{J} и \vec{H}

$$\vec{J} = \chi \vec{H}.$$

Связь между магнитной проницаемостью среды μ и магнитной восприимчивостью вещества χ

$$\mu = 1 + \chi.$$

Закон полного тока для магнитного поля в веществе (теорема о циркуляции вектора \vec{B})

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 (I + I').$$

Теорема о циркуляции вектора \vec{H}

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I.$$

Плотность тока смещения

$$\vec{j}_{см} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}.$$

Полная система уравнений Максвелла: в интегральной форме

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \quad \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV;$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}; \quad \int_S \vec{B} d\vec{S} = 0;$$

в дифференциальной форме

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad \text{div } \vec{D} = \rho;$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad \text{div } \vec{B} = 0.$$

4. Колебания волны

Уравнение гармонического колебания

$$s = A \cos(\omega_0 t + \varphi); \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu.$$

Дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний величины s

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + \omega_0^2 s = 0.$$

Период колебаний физического маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}} = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}.$$

Период колебаний математического маятника

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

Формула Томсона

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

Дифференциальное уравнение свободных затухающих колебаний величины s

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = 0.$$

Логарифмический декремент затухания

$$\theta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \delta T.$$

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний величины s

$$\frac{d^2 s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = x_0 \cos \omega t.$$

Реактивное индуктивное сопротивление

$$R_L = \omega L.$$

Реактивное емкостное сопротивление

$$R_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Длина волны

$$\lambda = vT.$$

Уравнение плоской волны

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0).$$

Уравнение сферической волны

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0).$$

Фазовая скорость

$$v = \frac{\omega}{k}.$$

Волновое уравнение

$$\Delta \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}.$$

Групповая скорость

$$u = \frac{d\omega}{dk}.$$

Уравнение стоячей волны

$$\xi = 2A \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \cos \omega t.$$

Эффект Доплера в акустике

$$\nu = \frac{(v \pm v_{\text{нп}})\nu_0}{v \mp v_{\text{ист}}}.$$

Вектор Умова – Пойнтинга

$$\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}].$$

Скорость распространения электромагнитных волн в среде

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

5. Оптика. Квантовая природа излучения

Закон отражения света

$$i_1' = i_1.$$

Закон преломления света

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n_{21}.$$

Формула толстой линзы

$$(N-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$$

Поток излучения

$$\Phi_e = \frac{W}{t}.$$

Энергетическая светимость

$$R_e = \frac{\Phi_e}{S}.$$

Энергетическая сила света

$$I_e = \frac{\Phi_e}{\omega}.$$

Энергетическая яркость

$$B_e = \frac{\Delta I_e}{\Delta S}.$$

Показатель преломления среды

$$n = \frac{v}{c}.$$

Оптическая длина пути

$$L = ns.$$

Оптическая разность хода

$$\Delta = L_2 - L_1.$$

Условие интерференционных максимумов

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Условие интерференционных минимумов

$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Оптическая разность хода в тонких пленках в отраженном свете

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} \pm \frac{\lambda_0}{2}.$$

Радиусы зон Френеля

$$r_m = \sqrt{\frac{ab}{a+b} m\lambda}.$$

Условие дифракционных максимумов от одной щели

$$a \sin \varphi = \pm(2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Условие дифракционных минимумов от одной щели

$$a \sin \varphi = \pm 2m\frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Условие главных максимумов дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = \pm m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Условие дополнительных минимумов дифракционной решетки

$$d \sin \varphi = \pm m' \frac{\lambda}{N} \quad (m' \neq 0, N, 2N, \dots).$$

Формула Вульфа — Брэггов

$$2d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 1, 2, 3, \dots).$$

Разрешающая способность спектрально-го прибора

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}.$$

Разрешающая способность дифракционной решетки

$$R = mN.$$

Закон Бугера

$$I = I_0 e^{-\alpha x}.$$

Продольный эффект Доплера

$$\nu = \nu_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}}.$$

Поперечный эффект Доплера

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Степень поляризации

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}.$$

Закон Малюса

$$I = I_0 \cos^2 \alpha.$$

Закон Брюстера

$$\operatorname{tg} i_B = n_{21}.$$

Оптическая разность хода в эффекте Керра

$$\Delta = l(n_o - n_e) = k_2 l E^2.$$

Угол вращения плоскости поляризации в кристаллах

$$\varphi = \alpha d.$$

Угол вращения плоскости поляризации в растворах

$$\varphi = [\alpha] C d.$$

Закон Кирхгофа для теплового излучения

$$r_{\nu,T} = \frac{R_{\nu,T}}{A_{\nu,T}}.$$

Энергетическая светимость черного тела

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\nu,T} d\nu.$$

Закон Стефана — Больцмана

$$R_e = \sigma T^4.$$

Закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}.$$

Формула Рэлея — Джинса

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT.$$

Формула Планка

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{kT} - 1}.$$

Уравнение Эйнштейна для внешнего фотоэффекта

$$h\nu = A + \frac{mv_{\max}^2}{2}.$$

Энергия фотона

$$\epsilon_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}.$$

Импульс фотона

$$p_\gamma = \frac{\epsilon_0}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

Давление света при его нормальном падении на поверхность

$$p = \frac{E_e}{c}(1 + \rho) = w(1 + \rho).$$

Изменение длины волны при эффекте Комптона

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0c}(1 - \cos\vartheta) = \frac{2h}{m_0c} \sin^2 \frac{\vartheta}{2}.$$

6. Элементы квантовой физики атомов, молекул и твердых тел

Обобщенная формула Бальмера

$$\nu = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

Первый постулат Бора

$$m_e v_n r_n = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Второй постулат Бора (правило частот)

$$h\nu = E_n - E_m.$$

Энергия электрона в водородоподобном атоме

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{Z^2 m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Длина волны де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Соотношение неопределенностей

$$\begin{cases} \Delta x \Delta p_x \geq h, \\ \Delta y \Delta p_y \geq h, \\ \Delta z \Delta p_z \geq h, \\ \Delta E \Delta t \geq h. \end{cases}$$

Вероятность нахождения частицы в элементе объемом dV

$$dW = |\Psi|^2 dV.$$

Условие нормировки вероятностей

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\Psi|^2 dV = 1.$$

Общее уравнение Шредингера

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta\Psi + U(x, y, z, t)\Psi = i\hbar \frac{\partial\Psi}{\partial t}.$$

Уравнение Шредингера для стационарных состояний

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - U)\psi = 0.$$

Волновая функция, описывающая состояние частицы в одномерной прямоугольной «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками»,

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin \frac{n\pi}{l} x \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Собственные значения энергии частицы в «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками»

$$\Delta E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{ml^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Коэффициент прозрачности прямоугольного потенциального барьера

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)}l\right).$$

Энергия квантового осциллятора

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega_0 \quad (n = 0, 1, \dots).$$

Уравнение Шредингера для электрона в атоме водорода

$$\Delta\psi + \frac{2m}{\hbar} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}\right) \psi = 0.$$

Нормированная волновая функция, отвечающая $1s$ -состоянию электрона в атоме водорода,

$$\psi_{100}(r) = \frac{1}{\sqrt{\pi a^3}} e^{-\frac{r}{a}}.$$

Закон Мозли

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Распределение Бозе — Эйнштейна

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} - 1}.$$

Распределение Ферми — Дирака

$$\langle N_i \rangle = \frac{1}{e^{\frac{E_i - \mu}{kT}} + 1}.$$

Уровень Ферми в собственном полупроводнике

$$E_F = \frac{\Delta E}{2}.$$

Удельная проводимость собственных полупроводников

$$\gamma = \gamma_0 e^{\frac{-\Delta E}{2kT}}.$$

Правило Стокса для люминесцентного излучения

$$h\nu = h\nu_{\text{люм}} + \Delta E.$$

7. Элементы физики атомного ядра и элементарных частиц

Радиус ядра

$$R = R_0 A^{1/3}.$$

Энергия связи нуклонов в ядре

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}]c^2.$$

Дефект массы ядра

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}}.$$

Магнетон Бора

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}.$$

Ядерный магнетон

$$\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p}.$$

Закон радиоактивного распада

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Период полураспада

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

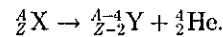
Среднее время жизни радиоактивного ядра

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

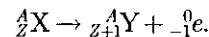
Активность нуклида

$$A = \left|\frac{dN}{dt}\right| = \lambda N.$$

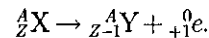
Правило смещения для α -распада



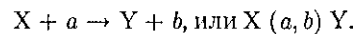
Правило смещения для β^- -распада



Правило смещения для β^+ -распада



Символическая запись ядерной реакции



(308) — 310 395 10
 310 163
 309 473 ()
 309 522) 12
 308 497 30, 111
 309 412 48
 268 107 (47, 147
 Адроны 515, 521, 522) 484
 484 289 367
 293 486 488, 499
 458 213 368
 484 261 128
 () 5 323
 404 443 514
 283 425 432
 507 514
 490 207
 253 265 514
 — — 514
 262 96 514
 463 () 514
 364 24 () 283
 343 () 282
 потока) 217 400
 353 203 298
 359 203 345
 310 283
 366 203 345
 132 205 287
 500 — — 283
 523 148 282
 487, 512 9 — — 282
 517 297 294,
 516 283 — —, поперечность 297
 516 —————электromагнитной ()
 518 299 9) 289 286
 310 —средней 9 ()
 310 283 — Пойнтинга 299) 282
 418

	282		58, 60,	192	
(		131			472
) 157			60	472	
	162		120	472	
--	239		127	307	150,
		60	84		
	365	384		299	138
367			60		
	483	102		350	
	319	--		350	
	291		109, 113	284	
	227, 265			349	350
(	) 91	268)
290			92	28	
	462				
62			210	339	
	62		8	--	(
	63		8		) 341
			10		
83		--	10		342
83, 117		--	10		
	96			342	
	490	лярно-волновая	318	332	
	488	-----частиц	398		336
			266	--	
262		--	266	335	
224			125		(
	436		478		лучах) 337
	169			137	94
(					363
) 226		463			
(	) 254		293	174	
	57		42		147, 160
518			43		282
5		) 43	(		319
	374	45		258	
41		43		9	
	346	289			321
	345	(
	26	) 24, 102		91	
62				-----средняя 91	
	82				
			300		
380			44	73	
490			143		72
	289		237		
			237	266	
	133				490
57		91			
	119	7		490	

--	490	основной	--	27
166, 243		неинерциальных	-----	механической 28
458		55		— Больцмана 372
				379
124				19
124		88		192
454		-----		223
		энергиям	95	
			94	
5		15		5
-----	основная 5	47		463
-----	производная 5	--		83
	170	47		
--	171	371		73
-----	плоского 171	147		476
-----	сферического 171	358		146
-----	цилиндрического 171	Мозли 431	--	147
--			--	476
170		302		168
-----	шара 170	(
		трения) 95		162
		15		500
26, 257		15		
,	126	17	169	
57		47		322
122		179	(	) 278
57	141			
57		--	(	) 278
		179		410
		183	--	408
		302		504
190		57		299
84				452
Амонтон —	18	-----	--	452
207		в	--	452
58		239	--	452
-----	— Лапласа	132	--	452
205		303	--	452
-----			--	452
--	83	302		333 — 335
-----	Больцмана 100			
360		483		295
352				Черенкова — Ва-
462		76	(	) 355
			(
78		373	)	435
Видемана — Франца	189	146		
		522		
		520	--	511
			--	511
			--	511
44	485	515		436 — 439
84		20		482
		39		429 — 431
		519		
- Джоуля — Ленца	182, 189	519		

	435		494	Комптоновское	490	489
369	()	--	494			
--	370		496		170	
	84, 105		496		171	
	477		(		171	
			) 6, 311		171	
306	515		(К-мезоны) 514		140	
	105		131			258
	105		131			86
	106	461	198,	31		
	105		66			
	83, 106		446		193	
	120	374			95	
120		446			265	
	477	522			278	
Изохора 84, 105		524			352	
	16	(				109
		) 6		цикла		115
	76	5			414	
	20	7			43	
	384	286, 318				
		319		503		
	436	319				184, 266
229		253				230
	226					18
	229	269				26, 44, 257
	203	--	269			350
	473	--	253			124
			264			29
	289					271
	286					143
	328		266			462
320					133	
	329	263			134	
439					363	
Майкельсона 329					361	
195	266				134	
	396					135
	196	263				135
	(	253				361
) 140		циркулярно			отрицательные	362
(	435	263		--	--	362
			85			140
			16			509
377		() 101			343	
178		--	109		(
			473		нуклида) 484	
	495		326		(
	495		497		заряда) 147	

	436			98		83
	436			504		523
	436		85			481
	436		15		—	оболочечная 481
Лептоны	515, 520		384	455	—	481
электронно-позитронно-фотонный	511		15	15	—	481
	305			477		44
				44		161
	312		44		6	161
	313			125		151
	305, 307			109, 113		419
	305, 307	Маятник		258	—	
	305			257		38
	312			257	—	точки 38
		МГД-генератор	201		—	
--			513, 514, 522, 523			() 236, 423
	151		131		—	магнитный 236, 423
					—	38
						()
	164		вращающегося	381	34	161
			()			
	58		) 255			
неохлаждаемые	97		333			235
					—	235
						37
	361		138		—	точки 37
	361		81		—	132
360		--		81		Уитстона 184
каналовые ()	198			244		185
	198		64		—	24
			63			490
			321		—	490
	306		479		—	490
	()					
	311	Метр 5	7			182
	()		7, 404			
потока) 311			7			515
Люминесценция	461		7			Мюоны 512
	461			329		
						113
	236					238
	479		364			
						436
Магнитострикция	243, 292			313		469
	236		338		—	469
	436	--		339	—	469
		—,	340		—	471
338				287		43
		Модель		()		379
	60		) 391			43

	358		141	--		157
	307				443	
		405				
	138	--			149	
	155			--		
	154		147	(		) 217
--			(р-типа) 458		311	218
--	174		454			183
--		233	457			
	153		(		421	
	95		359	) 458		
--	95				484	
		94	160	-----	бета-распада 484	
	177	--		(		12
--		248	) 161		207, 209	
--	248	--	162		223	
-----В	248	--		(
			) 161			68
	(излучательности)		162		462	
	370		167			
-----черного	371		(		44	
		283	) 368			44
	251		364			44
--		50, 158				44
		(	289		524	
	) 352			289		68
	426				71	
	498		-----дальний 126			313
	523		126			
--		107			237	
			287			
--	303	--	287		451	
--			84, 93			311
	303			--		311
	215		110			
	202		85			
--		208	47		363	
--	215		205, 208	(		) 363
--	216		85			363
--		206				138
--		206	339		138	
	25, 156		374			213
	451					111
	148		483		316, 332	
	(		392		-----	332
) 49			Стефана—Большмана 372			435
--	49, 149		214			
-----центральное	49		148	(
	246	Постулат		) 69		
	251					
--	148	--	) 393		17	
--	155, 215		(
	132		) 393			
			50			424

	() 108	—	196
	политропный 108	—	196
(Галилея) 68	195	—	дуговой 199
-- 251	83	—	искровой 198
425	108	—	коронный 199
408	-- 108	—	тлеющий 197
71	электронно-позитронно-		483
-- Бора 412	()		Бозе — Эйн-
() 285	511		443
--) 205	268	--	Гиббса 442
— электромагнитных 205		--	— Дирака 443
— электростатических	253		
150	103		341
305	12		342
	405		498
	167		287
() 55	167		306
315—318	167		105
172			106
469	191		505
	23		506
457	23		506
— дырочная (<i>p</i> -типа) 458			506
— электронная (<i>n</i> -типа) 458	140		506
-- 454	30		508
<i>p-n</i> -перехода	30		496
() 471	83		497, 498
180	6		497
-- 180	482		497
170	482		502
	482		504
147	461		
147	395		504
-- 163	()		504
205	) 319		— неуправляемая 504
			— управляемая 504
197	126		507
441			290
197			271
327			271
146	477		276
()	504		277
282	157		271
106			437
105	— контактная 463		457
изохорный 105	— внешняя 464		() 490
106	— внутренняя 464		Рентгенолюминесценция 461
	286		304
-- 321			135
195			

--	339		138	138		133
--	341		138	138		213
--	(341	Сжижение	125	125		213
	132	15			62	395
133	()		58			443
463			(47			8
484			25			28
			25			28
226		--	54			134
181,		—коэрцитивная	167, 242			265
		--	53			19
142		линзы	147		-- замкнутая (изолирован-	19
357		--	307		)	437
357		--	307			8,52
плоскополяризованный		--	307		-- инерциальная	15
(			209	(пондеро-	-- неинерциальная	52
) 357		моторная)	174			
358			17			46
357			18			82
			128			426
358			65			191
(излучательность) 310			) 16	((
--	370		21			) 226
--	372			(		волн
()		излучения)	310		285, 400	284, 400
304			17			(
353			177			) 51
197		-- качества	17		-- вторая (параболическая)	
197			19		51	
258			48		--	51
			26			89
134, 431		--	178			65
ковалентная 134, 431			222			89
45				135		86
166			19			9
5		гироскопические	19		--	9
484			42		--	9, 10
						12
392			119			
392			244			
Лаймана 392			117			262
Пашена 392			117		—одного	
392			178		261	
392			480			465

	467		429		141
--	469		419		31
	129	--	451		8
112					371
	354		350		31
	354		327		371
	163		рентгеновская 343		290
172			515		82
	лоренцево 74		423		444
	204, 215		479	Дебая	
	Гейзенберга 401		Спиральность 517	446	
	65				124
	275		345		120
	274, 275	--	--		376
--	274	--	344		376
--	274		345		152, 163, 217
			тельная 370		217
	181			— для	
— удельное 180			434	— электростатического	153
	122		434	— диэлектрика 164	
	120		436	Карно 114	
системы			284	Нернста — Планка 112	
	436		281		214
-- энергетическое 395			7	— напряженности	
		--		240	
	422	--		— электростатиче-	
	97	--	-- Дирака 425	156	
			200	Штейнера 36	
	86		358		150
— линейчатый 290	290			396	
--	290		100		150
	421		6	126	
	391, 421		197	246	
	349, 408		360		76
	338		519	-- специальная (релятиви-	
	433		198	) 7, 69	
--	433		() 140		186
— колебательно-враща-					69
	433		126		315
--			493	--	315
	433			--	315
--	433	--		--	317
— поглощения 396		--			451
	353		495		
	353, 408		сцинтилляционный 493	445	
	349		493		
	429				447
--					103
	430		8		

190			18	--	
103				461	265
103					104
	94	(	) 473		59
		--	473		
140		--	473		
	142		125		87
	(		—	60	107
) 466					84
	82		58	--	85
181					406
			308		
181			66		381
	113		360		
	466		129		8
(			303		
индукции) 208			342		250
58			Удар (соударение) 30		289
	(	) 63		32	
	(	)	--	31	289
63				31	
	(			287	396
) 58				183	--
	221				396
	273		132	--	458
	177		292	--	458
	192				457
	273		383		410
	177				10
	177		136		10
	247		137	,	
			136		11
	465		137		11
	177		107		10
(	) 225		60	,	
216			119		11
	120		284, 406		13
166, 243			283		Ускорители
8		--	287		211
82, 143					—индукционные 212
реперные 82			точки 16		—импульсные 211
9		--		21	—линейные 212
	230		105		—резонансные 212
	231		106		—непрерывные 211
	231		105		—циклические 212
	18		85		
	18		Клапейрона – Менделеев-		321
			85	--	321
18			—		
18			143		405
18, 94					
18			254		92
18		--			
			269		182

(	) 141	379	,
— начальная	283	381	520
— —	254	490	13
	254	282	254
	213	403	260
(	) 148, 170	425	271, 276
	443	371	265
	425		519
	245	88	442
	241	— Больцмана	барионное 522
Лиссажу	263	— по	284
	81	88	476
	375	— по	410
	461		396, 419
	307	89	419
289	446	192, 379	419
		379	423
90		461	— магнитное 423
	392		479
— Брэггов	343	Холодильник	136
	398	113	520
	130	523	86
	210	462	63
	374	258	92
	64		100
	— Дэшмана	()	— точки 9
193	373	20	323
—	260	275	
Торричелли	62	109	491
	360	109	82
	22	115	
	461	114	82
Фотолюминесценция	461	508	82,
	310	— протонно-протонный	115
	380, 384, 515, 520	508	Экситоны 461
	379	— углеродно-азотный	461
	459	508	227
	460	212	167
	460		146
	383	214	177
	383	— —	225
	384	— поля	461
	383	155	
	496	179	146, 520
	378	319	489
безынерционность	380	523	191
	379	517	343
	378	424	
		194	

193		—	117	366
		— упруго		Комптона 385
	192	ного	26	448
	193	—	78	490
473	192	—	478	237
23		—	477	98
	455	—	удельная 478	69
	99			414
			173	Фарадея 368
174			444	213
--		--	298	420
173			123	465
	195			Пельтье 466
	24			467
--				221
256		42		94
	23	Джозефсона 449		
	416	—	449	
	127	—	449	166
78		—	Томсона 123	— магнитного 242
	256		237	483
--			291,	-- 483
--	27	354		-- 478
--	231	—		-- 478
--	174	—	354	30, 410
--	25	—	355	311
--		—	354	366
256			420	элементарная 134

Предисловие	3	§ 14.	29
.....	4	§ 15.	30
.....	4	.....	33
.....	5	.....	34
i		Глава 4.	34
Глава 1.	7	§ 16.	34
§ 1.	7	§ 17.	36
.....	7	§ 18.	37
§ 2.	9	§ 19.	38
§ 3.	10	§ 20.	40
§ 4.	12	§ 21.	42
.....	13	.....	45
.....	14	.....	45
Глава 2.	14	Глава 5.	46
§ 5.	14	§ 22.	46
§ 6.	15	§ 23.	48
§ 7.	17	§ 24.	49
§ 8.	17	§ 25.	49
§ 9.	19	§ 26.	51
§ 10.	21	§ 27.	52
.....	22	.....	55
.....	22	.....	56
Глава 3.	23	Глава 6.	57
§ 11.	23	§ 28.	57
§ 12.	24	§ 29.	58
.....	24	.....	58
§ 13.	27	.....	58
.....	27	.....	58

§ 30.	Бернулли	59			87
§ 31.	()	62	§ 45.		90
§ 32.	вязкости	63	§ 46.		91
§ 33.		64	§ 47.		92
		66	§ 48.		94
		66	§ 49.		96
Глава 7.		67			98
()		67			99
§ 34.		67	Глава 9.		99
§ 35.	(частной) теории	68	§ 50.		99
§ 36.		70			99
§ 37.		71	§ 51.		101
§ 38.		75	§ 52.		102
§ 39.		76	§ 53.		103
§ 40.		77	§ 54.		105
		79			106
		79	§ 55.	Политронный	108
			§ 56.	()	108
			§ 57.		109
			§ 58.		111
			§ 59.	холодильные	113
					115
					116
					551

2

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ

Глава 8.		81			
§ 41.		81			
§ 42.	Клапейрона—	84			
§ 43.	молекулярно-кинетической	86			
§ 44.					

Глава 10.		§ 81.	
§ 60.	.....117	§ 82.	.....152
§ 61. Уравнение	.....117	§ 83.	.....153
§ 62.	.....120	§ 84.	.....155
§ 63.	.....122	§ 85.	.....158
§ 64. — Томсона ...	123	§ 86.	.....159
§ 65.	.....125	§ 87.	.....160
§ 66.	.....126	§ 88.	.....162
§ 67.	.....128	§ 89.	.....163
§ 68.	.....130	§ 90.	.....164
§ 69.	.....131	§ 91.	.....166
§ 70. Моно- и	.....132	§ 92.	.....167
§ 71.	.....133	§ 93.	.....170
§ 72.	.....137	§ 94.	.....170
§ 73.	.....138	§ 95.	.....173
§ 74.	.....139		.....175
§ 75. I и II рода	.....141		.....176
§ 76.	.....142	Глава 12.	.....177
	.....144	§ 96.	.....177
	.....145	§ 97.	.....178
	3		
Глава 11.	.....146		
§ 77.	.....146		
§ 78.	.....147		
§ 79.	.....148		
§ 80. Принципы	.....150		

§ 98.	.....	179	§ 115.	.....	210
§ 99.	— Ленца	181	§ 116.	.....	211
§ 100.	.....	182	§ 117.	.....	213
§ 101.	.....	183	§ 118.	\vec{B}	214
	.....	185	§ 119.	.....	215
	.....	186	§ 120.	.....	217
Глава 13.	.....	186	§ 121.	B перемещению	218
§ 102.	.....	186		.....	219
§ 103.	.....	188		.....	220
§ 104.	.....	191	Глава 15.	.....	221
§ 105.	.....	191	§ 122.	.....	221
§ 106.	194	(.....)	221	§ 123.
§ 107.	.....	196	§ 124.	.....	222
§ 108.	.....	200	§ 125.	(.....) ..	224
	.....	201	§ 126.	.....	225
	.....	202	§ 127.	.....	226
Глава 14.	.....	202	.....	.....	227
§ 109.	.....	202	§ 128.	.....	229
§ 110.	— — Лапласа расчету	205	§ 129.	.....	230
§ 111.	Ампера.	207	§ 130.	.....	231
§ 112.	.....	208	.....	.....	233
§ 113.	.....	208	.....	.....	234
§ 114.	.....	209	Глава 16.	.....	234
на .....	.....	209	§ 131.	.....	234
			§ 132. Диа-	.....	236
			§ 133.	.....	238
			§ 134.	.....	240
			§ 135.	.....	241

§ 136.	.. 243	(
	..... 245).
	..... 245		..... 271
Глава 17.		§ 149.	..... 273
	..... 246	§ 150.	..... 276
§ 137.	..... 246	§ 151.	..... 277
	..... 246	§ 152.	..... 278
§ 138.	..... 247		..... 279
§ 139.	..... 249		..... 280
	..... 252	Глава 19.	..... 281
		§ 153.	..... 281
	4		..... 281
		§ 154.	..... 283
Глава 18.			..... 285
	..... 253	§ 155.	..... 286
§ 140.	..... 253	§ 156.	..... 287
§ 141.	..... 255	§ 157.	..... 289
§ 142.	..... 256	§ 158.	..... 291
	..... 256	§ 159.	..... 292
§ 143.	..... 258		..... 293
	..... 261		..... 294
§ 144.	..... 262	Глава 20.	..... 294
	..... 262		..... 294
§ 145.	..... 262	§ 161.	..... 294
	..... 262	§ 162.	..... 297
§ 146.	..... 264	§ 163.	..... 298
	(	§ 164.	..... 299
	)		..... 301
	..... 264		..... 301
§ 147.			5
	(	Глава 21.	..... 302
	)		..... 302
§ 148.	..... 268	§ 165.	..... 302

§ 166.	.		§ 184.	.....	345
		304		.....	347
§ 167.	()	308		.....	348
§ 168.			Глава 24.		
	и	310		.....	349
§ 169.			§ 185.	.....	349
	ОПТИКИ	311	§ 186.	.....	350
		314		.....	350
		314	§ 187.	()	
Глава 22.		315		.....	352
§ 170.			§ 188.	.....	354
		315	§ 189.		
§ 171.				Черенкова —	355
		318		.....	356
§ 172.		320		.....	356
§ 173.			Глава 25.		357
		321	§ 190.		
§ 174.				.....	357
		324	§ 191.		
§ 175.				.....	359
		327		.....	359
		330	§ 192.		
		331		.....	360
Глава 23.		331	§ 193.		
§ 176.				.....	363
	—	331	§ 194.		
§ 177.				.....	364
		333	§ 195.	оптическая	
§ 178.				.....	366
		335	§ 196. Вращение		
§ 179.				.....	367
		337		.....	368
§ 180.				.....	369
		339	Глава 26.		
§ 181.				.....	369
		341	§ 197.		
§ 182.				.....	369
		342	§ 198.		371
	—	342	§ 199.	— Больцмана	
§ 183.				.....	372
		343	§ 200.	— Джинса	
				.....	373
			§ 201.		
				.....	376

§ 202. Виды	
§ 203.	378
свойств	380
§ 204.	383
§ 205.	
Давление	384
§ 206. Комптона	
	385
§ 207.	
волновых свойств	
	387
	388
	389

6

ФИЗИКИ АТОМОВ,

Глава 27.	
	390
§ 208.	390
§ 209.	392
§ 210.	393
§ 211.	393
§ 212.	395
	397
	397
Глава 28.	
	398
§ 213.	398
§ 214.	400
§ 215.	400
§ 216.	403

§ 217.	
	406
§ 218.	408
§ 219.	409
§ 220.	
«	
»	
«	
»	409
§ 221.	
	412
§ 222.	
	415
	417
	417
Глава 29.	
	418
§ 223.	418
§ 224. 1s-Состояние электрона	422
§ 225.	423
§ 226.	
тождественных	424
§ 227.	
	425
§ 228. Периодическая	
	426
§ 229.	429
§ 230.	
:	
,	
	431
§ 231.	
	433
§ 232. Поглощение.	
	434

§ 233.	()	436
	.....	439
	.....	440
Глава 30.		441
§ 234.		441
§ 235.	—	
§ 236.	Ферми–Дирака	442
	.....	444
§ 237.		445
§ 238.	электропроводности	447
§ 239.		448
	.....	450
	.....	450
Глава 31.		450
§ 240.		450
§ 241.		452
§ 242.		454
§ 243.		457
§ 244.		459
§ 245.		461
§ 246.		463
§ 247.	явления	465
§ 248.	— полупроводник	467
§ 249.	полупроводников (<i>p-n</i> -переход).	469

§ 250.	()	472
	.....	474
	.....	475

7

Глава 32.		476
§ 251.	Размер,	476
§ 252.		477
§ 253.		478
§ 254.		480
§ 255.		481
§ 256.		483
§ 257.		484
§ 258.	β^- -Распад.	486
§ 259.		488
§ 260.	γ -излучения ()	490
§ 261.		492
§ 262.	реакции	496
§ 263.	β^+ -Распад.	498
§ 264.		500
§ 265.		502
§ 266.		503
§ 267.		505

§ 268.	507	§ 273.	516
.....	509	§ 274.	518
.....	510	§ 275.	520
Глава 33.	510	.....	524
§ 269.	510	.....	525
§ 270. Мюоны	512	.....	526
§ 271.	513	.....	537
§ 272.	514		

Т. Ф.

А.П. , В.А.Жилкина

А 926 XI. 29.09.2005. 70 100/16.
«Таймс», . 2. . . . 45,5.
4900 . 15522.

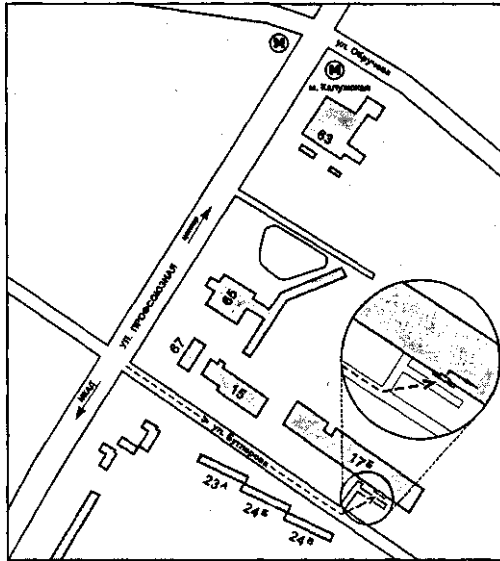
«Академия». www.academia-moscow.ru

117342, . . , 17-Б, . 360. / : (095)330 1092, 334 8337. 77.99.02.953. .004796.07.04 20.07.2004.

410004, . « . ».
59.

- (. . . , 9.) . / : (095) 152-1878
- « » (. . . , 16, 5 , 20;
- 3 , 166)
- (. . . , 9, « »)
- (. . . , 8)
- (. . . , 7/5; . . . , 4)
- « » (. . . , 6)
- (. . . , 40)
- (. . . , 25)
- « » (. . . , 9)
- « » (. . . , 12; , 78)

- (. . . , 17-Б, 3 , . 360 (« »).
- / : (095) 334 7873, 330 1092, 334 8337.
- E mail: sales@academia-moscow.ru



- . . . 10 (« »).
- / : (095) 975 8927, 975 8928. E mail: sales@academia-moscow.ru
- . . . 211-213, « ».
- / : (812) 259-6229, 251 9253. E mail: fspbacad@comset.net
- ()