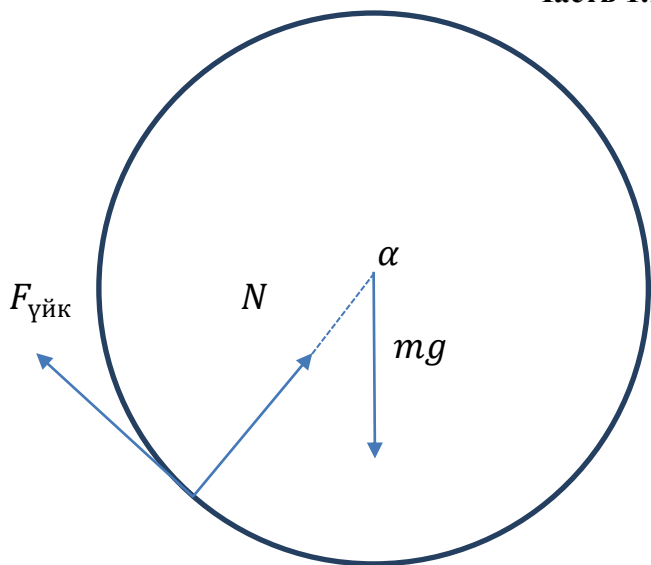


Физикадан республикалық олимпиада есептерінің шешімдері-2024
11 сынып

Есеп 1 [10,0 ұпай].
1.1-Бөлім. (3,0 ұпай)

Часть 1.1 (3,0 ұпай)



Біз айналу осі ретінде шардың үстелдің шетімен жанасу нүктесін таңдаймыз және момент ережесін жазамыз:

$$mgsin\alpha \cdot R = I \cdot \varepsilon$$

мұндағы Штейнер теоремасы бойынша шардың инерция моменті:

$$I = \frac{2}{5}mR^2 + mR^2$$

ал бұрыштық үдеу:

$$\varepsilon = \frac{a}{R}$$

бұдан үдеу:

$$a = \frac{5}{7}gsin\alpha$$

Шарик үшін Ньютонның екінші заңын жазайық:

$$mgsin\alpha - F_{тр} = ma$$

мұндағы үйкеліс күші:

$$F_{тр} = \mu N$$

Ал қалыпты қысым күші:

$$N = mg\cos\alpha - m\frac{v^2}{R}$$

Энергияның сақталу заңын жазамыз:

$$mgR(1 - \cos\alpha) = \frac{I\omega^2}{2} = \frac{I(v/R)^2}{2}$$

Бұдан үйкеліс коэффициенті:

$$\mu = \frac{2sin\alpha}{17\cos\alpha - 10}$$

Мазмұны	Ұпайлар
$mgsin\alpha \cdot R = I \cdot \varepsilon$	0,5
$I = \frac{2}{5}mR^2 + mR^2$	0,25
$\varepsilon = \frac{a}{R}$	0,25
$a = \frac{5}{7}gsin\alpha$	0,25
$mgsin\alpha - F_{тр} = ma$	0,5
$F_{тр} = \mu N$	0,25
$N = mgcos\alpha - m\frac{v^2}{R}$	0,5
$mgR(1 - cos\alpha) = \frac{I\omega^2}{2} = \frac{I(v/R)^2}{2}$	0,25
$\mu = \frac{2sin\alpha}{17cos\alpha - 10}$	0,25
Барлығы	3,0

1.2 Бөлім (4,0 ұпай)

Газ энергиясының толық өзгеруі сыртқы күштердің жұмысының нәтижесі болып табылады, ол энергияның сақталу заңынан шығады.

$$\Delta U + \Delta E_k = \Delta A' \quad (1)$$

$$\Delta A' = P_1\Delta V_1 - P_2\Delta V_2 \quad (2)$$

$$P_1\Delta V_1 = \nu RT_1 \quad (2)$$

$$P_2\Delta V_2 = \nu RT_2 \quad (4)$$

$$\Delta A' = \nu R(T_1 - T_2) \quad (5)$$

Ішкі энергияның өзгерісі

$$\Delta U = \nu C_v(T_2 - T_1) \quad (6)$$

Кинетикалық энергияның өзгерісі

$$\Delta E_k = \frac{\nu M (v_2^2 - v_1^2)}{2} \quad (7)$$

(5), (6) және (7) теңдеулерін (1) теңдеуіне қойып, аламыз

$$\nu C_v(T_2 - T_1) + \frac{\nu M (v_2^2 - v_1^2)}{2} + \nu R(T_2 - T_1) = 0 \quad (8)$$

немесе

$$(C_v + R)(T_2 - T_1) + \frac{M (v_2^2 - v_1^2)}{2} = 0 \quad (9)$$

Осыны ескере отырып

$$C_v + R = C_p \quad (10)$$

$$C_p T + \frac{M v^2}{2} = const \quad (11)$$

$$C_p T_1 + \frac{M v_1^2}{2} = C_p T_2 + \frac{M v_2^2}{2} \quad (12)$$

v_1^2 жылдамдығын елемеуге болатынын ескере отырып. Және де газ вакуумға өтеді, сондықтан $T_2 = 0$

$$C_p = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)} \quad (13)$$

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma RT}{M(\gamma - 1)}} \approx 1.6 \text{ км/с} \quad (14)$$

Мазмұны		Ұпайлар
1	$\Delta U + \Delta E_k = \Delta A'$	0,5
2	$\Delta A' = P_1 \Delta V_1 - P_2 \Delta V_2$	0,25
3	$P_1 \Delta V_1 = \nu R T_1$	0,25
4	$P_2 \Delta V_2 = \nu R T_2$	0,25
5	$\Delta A' = \nu R (T_1 - T_2)$	0,25
6	$\Delta U = \nu C_V (T_2 - T_1)$	0,25
7	$\Delta E_k = \frac{\nu M (v_2^2 - v_1^2)}{2}$	0,25
8	$(C_V + R)(T_2 - T_1) + \frac{M (v_2^2 - v_1^2)}{2} = 0$	0,25
9	$C_V + R = C_p$	0,25
10	$C_p T + \frac{M v^2}{2} = const$	0,5
11	$C_p T_1 + \frac{M v_1^2}{2} = C_p T_2 + \frac{M v_2^2}{2}$	0,25
12	$C_p = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)}$	0,25
13	$v = \sqrt{\frac{2\gamma T}{M(\gamma - 1)}}$	0,25
14	$v \approx 1.6 \text{ км/с}$	0,25
Барлығы		4,0

1.3 Бөлім (3,0 ұпай)

Бастапқы қысым P деп есептейміз. Онда кішігірім өзгерістер үшін келесі теңдіктерді жазуға болады

$$PV^\gamma = (P + dP)(V - dV)^\gamma \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{P} = -\gamma \frac{\Delta V}{V} \quad (2)$$

Көлемнің аз ғана өзгерісі үшін келесі формуланы қолданамыз

$$\Delta V = S\Delta x \quad (3)$$

Мойын ішіндегі газ үшін қозғалыс теңдеуін аламыз

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = dpS \quad (4)$$

$$\rho l S \frac{d^2 x}{dt^2} = -\gamma P \frac{\Delta V}{V} S = -\gamma P \frac{xS^2}{V} \quad (5)$$

$$\rho l \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma P \frac{xS}{V} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\gamma PS}{\rho l V} x = 0 \quad (7)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma PS}{\rho l V}} \quad (8)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma PS}{\rho l V}} \quad (9)$$

Дыбыс жылдамдығы үшін өрнекті қолдана отырып келесі теңдікерді аламыз

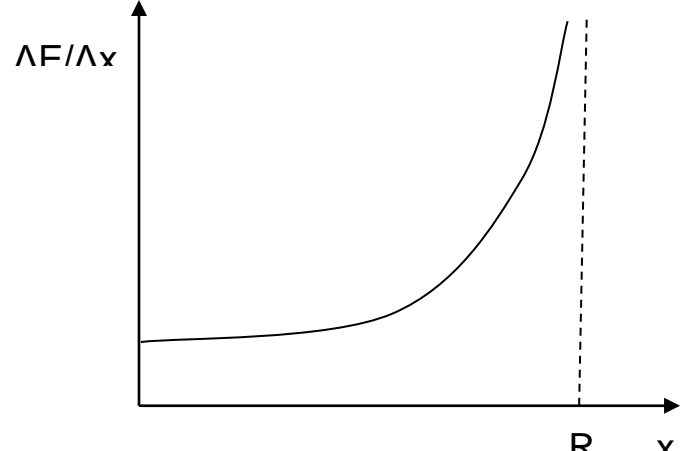
$$c = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}} = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}} \quad (10)$$

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{lV}} \quad (11)$$

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi r^2}{l^{\frac{4}{3}} \pi R^3}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{3r^2}{4lR^3}} \quad (12)$$

Мазмұны	Ұпайлар
Формула 2: $\frac{\Delta P}{P} = -\gamma \frac{\Delta V}{V}$	0,5
Формула 3: $\Delta V = S\Delta x$	0,25
Формула 4: $m \frac{d^2 x}{dt^2} = dpS$	0,25
Формула 6: $\rho l \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma P \frac{xS}{V} = 0$	0,5
Формула 9: $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\gamma PS}{\rho l V}}$	0,5
Формула 10: $c = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$	0,5
Формула 12: $f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{3r^2}{4lR^3}}$	0,5
Барлығы	3,0

Есеп 2. Радиотерапия (10,0 ұпай)

Пункт	Мазмұны	Ұпайлар
1	$F = \frac{qe \sin^2 \varphi}{4\pi\epsilon_0 b^2}$	0,5
2	$dp = F dt$	0,25
3	Симметриядан, электрон импульсінің толық өсімшесі x осіне перпендикуляр бағытталатындығын ескереміз $\Delta p = \Delta p_y = \int F \sin \varphi dt = \int_{-\infty}^{\infty} F \sin \varphi / v dx = \int_0^{\pi} \frac{qe \sin \varphi}{4\pi\epsilon_0 b v} d\varphi$ $= \frac{qe}{2\pi\epsilon_0 b v}$	1,0
4	$\Delta e = \Delta p^2 / 2m_e = \frac{q^2 e^2}{8\pi^2 \epsilon_0^2 b^2 v^2 m_e}$	0,5
5	$\Delta p_{max} = 2m_e v$	0,5
6	$\Delta p_{max} = \frac{qe}{2\pi\epsilon_0 b_{min} v} \Rightarrow b_{min} = \frac{qe}{2\pi\epsilon_0 \Delta p_{max} v} = \frac{qe}{4\pi\epsilon_0 m_e v^2}$	0,5
7	$\Delta e = \frac{q^2 e^2}{8\pi^2 \epsilon_0^2 b^2 v^2 m_e} \geq I \Rightarrow b_{max} = \frac{qe}{4\pi\epsilon_0 v} \sqrt{\frac{2}{m_e I}}$	0,5
8	$dN = n 2\pi b \Delta x db, dE = dN \Delta e = \frac{q^2 e^2 n \Delta x db}{4\pi\epsilon_0^2 b v^2 m_e}$	0,5
9	$\Delta E = \int_{b_{min}}^{b_{max}} \frac{q^2 e^2 n \Delta x db}{4\pi\epsilon_0^2 b v^2 m_e} = \frac{q^2 e^2 n \Delta x}{4\pi\epsilon_0^2 v^2 m_e} \ln \frac{b_{max}}{b_{min}} =$ $= \frac{q^2 e^2 n \Delta x}{8\pi\epsilon_0^2 v^2 m_e} \ln \frac{2m_e v^2}{I} = \frac{q^2 e^2 m n \Delta x}{16\pi\epsilon_0^2 E m_e} \ln \frac{4m_e E}{mI}$	1,0
10	$\Delta x = \frac{16\pi\epsilon_0^2 m_e}{q^2 e^2 m n \ln \frac{4m_e E_0}{mI}} E \Delta E, \int_0^R \Delta x = \frac{16\pi\epsilon_0^2 m_e}{q^2 e^2 m n \ln \frac{4m_e E_0}{mI}} \int_0^{E_0} E \Delta E$ $\Rightarrow R = \frac{8\pi\epsilon_0^2 m_e E_0^2}{q^2 e^2 m n \ln \frac{4m_e E_0}{mI}}$	1,0
11	Энергияның бөлінуі бөлшектің энергиясына кері пропорционал болғандықтан және де максималды ені тереңдігіне жақындаған кезде энергия нөлге ұмтылады, онда осы тереңдікте энергия бөлінуі шексіздікке ұмтылады. 	0,75
12	$n = \frac{(2Z(H) + Z(O))\rho_{H_2O} N_A}{2M(H) + M(O)} = 3.3 \times 10^{29} \text{ м}^{-3}$	1,0

13	$I = \frac{2I(H)Z(H) + I(O)Z(O)}{2Z(H) + Z(O)} = \frac{2I(H)Z(H) + I(O)Z(O)}{2Z(H) + Z(O)} = 89.1 \text{ эВ}$	1,0
14	$R_p = 16.2 \text{ см}$	0,5
15	$E_0 \approx 50 \text{ МэВ}$	0,5
	Барлығы	10,0

Есеп 3. Электрондық эмиссия (10,0 ұпай)

Фотоэффект

3.1. Фотонның әр бір квантының энергиясы

$$\varepsilon = h\nu, \quad (1) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

мұндағы электромагниттік сәулелену жиілігі келесі формуламен анықталады

$$\nu = c/\lambda. \quad (2) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Фотонды жұту кезінде электрон алған энергия (бұл тек үшінші объектінің, атап айтқанда, электронды қоршаған металдың кристалдық торының қатысуымен мүмкін екенін ескеріңіз!) потенциалдық тосқауылды еңсеру үшін шығу жұмысынан асып кетуі керек:

$$\varepsilon > A. \quad (3) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

(1)-(3) жинақтап, толқын ұзындығы келесі шамадан артып кетпеуі керек екендігіне өол жеткіземіз

$$\lambda < \lambda_0 = \frac{hc}{A} = 332 \text{ нм}. \quad (4) \quad (0.3 \text{ ұпай})$$

3.2. $U > U_1 = 2 \text{ В}$ кернеулерде фототок қаныққанын ескереміз. Бұл катодтан ыршып шыққан барлық электрондар үдеткіш кернеудің әсерінен анодқа жете алатындығын көрсетеді. Тиісті $I_0 = 4 \text{ мкА}$ қанығу тогы үшін уақыт бірлігінде ыршып шығатын электрондарды анықтаймыз

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{I_0}{e} \quad (5) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Катодтан ыршып шыққан әрбір электронға оны жұлып алатын бір фотон сәйкес келетіндіктен, сәулелену қуаты үшін келесі теңдікті аламыз

$$W = \frac{\Delta N}{\Delta t} \varepsilon. \quad (6) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Өзра (1) мен (5) -ті (6)ға біріктіре отырып, келесі шаманы есептейміз:

$$W = 23 \text{ мкВт}. \quad (7) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Шындығында, талап етілетін W шамасы (7)-ден табылған мәнінен біршама жоғары, өйткені кванттық шығу – ыршып шығатын электрондар санының түскен фотондар санына қатынасы бірден аз.

3.3. Электронның кинетикалық энергиясы K -ға тең болсын. Эйнштейн теңдеуіне сәйкес,

$$\varepsilon = A + K. \quad (8) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Электронның толық энергиясы V_0 кернеуден өткен кезде нольге тең болса, оның анодқа қарай қозғалысы тоқтатайды, яғни

$$K + eV_0 = 0 \quad (9) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Өзара (1), (2), (9) жинақтап, оларды (8)-ге қоя отырып, келесі нәтижеге қол жеткіземіз

$$V_0 = \frac{hc/\lambda - A}{-e} = -2 \text{ В}. \quad (10) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Жауапты жазған кезде кернеудің таңбасын ескеру маңызды!

3.4. Электрондардың кинетикалық энергиясы классикалық теңдікпен анықталады

$$K_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}. \quad (11) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Өзара (9)-(10)ды (11)-мен біріктіріп, келесі шаманы есептейміз

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2eV_0}{m}} = 838.7 \text{ км/с}. \quad (12) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Вакуумдық диод

3.5. Жүйенің қалыптасқан күйін қарастырамыз. ЭҚК-тің полярлығы өзгергеннен кейін бірден вакуумдық диод, конденсатор мен резисторды кернеу генераторынан оқшаулайды және резистор разрядталады. Келесі теңдікке назар аударамыз

$$RC/T = 100 \gg 1, \quad (13)$$

бұл конденсатордың релаксация уақыты кернеудің тербеліс периодынан әлдеқайда көп екенін көрсетеді. Демек, резистордағы конденсатордың разрядталу периоды, конденсатордағы зарядтың аздаған өзгерістерімен бірге жүреді, демек, одан әрі есептеулерді жеңілдетуге болады, өйткені $\Delta I_R \ll I_R$ (0.2 ұпай). Бұдан былай біз I_R -ді резистордағы ток күшінің орташа немесе максималды/минималды мәні ретінде қабылдаймыз ба, жоқ па, ол маңызды емес, бірақ авторлық шешімде қарапайымдылық үшін біз оның максималды ток күшіне сәйкес келеді деп есептейміз.

ΔI_R амплитудасын анықтау үшін, разрядталуы кезінде конденсатордың Δq зарядының өзгеруін анықтау керек, өйткені олар келесі қатынаспен байланысқан

$$\frac{\Delta I_R}{I_R} = \frac{\Delta U_C}{U_C}, \quad (14) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

мұндағы конденсатор кернеуі резистордағы кернеуге тең

$$U_C = I_R R, \quad (15) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

келесі қатынасты ескереміз

$$\Delta U_C = \frac{\Delta q}{C}, \quad (16) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

және де резистор I_R ток күшімен разрядталған кезде, конденсатордың зарядының аз ғана өзгерісін ескере отырып, T уақытында ағып кеткен зарядтың мөлшерін шамамен есептейміз:

$$\frac{\Delta q}{T} = I_R. \quad (17) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

(15)-(17) -ні (14)-ке өя отырып, және де (13) -ті ескеру келесі жауапты алуға мүмкіндік береді

$$\frac{\Delta I_R}{I_R} = \frac{T}{CR} = 10^{-2}. \quad (18) \quad (0.4 \text{ ұпай})$$

Сыртқы кернеу қайтадан берілгенде, диод қайтадан ашылады және генератор конденсаторды зарядтайды, сонымен қатар резистордағы ток күшін қайтадан $I_R - \Delta I_R$ -ден I_R -ге дейін арттырады – цикл әрі қарай қайталанады.

3.6. τ уақыт шамасында, конденсатор жоғалған Δq зарядын қайтадан толықтырады, ал резистордағы ток күші қайтадан ΔI_R шамасына артады. Тізбек үшін Кирхгофтың екінші ережесін жазамыз:

$$U_0 = U(I_D) + I_R R, \quad (19) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

мұндағы диодтағы I_D ток күші келесі теңдікпен анықталады

$$I_D = I_R + I_C, \quad (20) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

және де I_C осы кезеңде конденсатор зарядталатын жылдамдық болып табылады. Жалпы айтқанда, I_C уақыттан тәуелді функция, алайда, конденсатордағы зарядтың аз ғана өзгеруіне және сәйкесінше I_C -тің I_R -ге қарағанда аздығына байланысты, берілген ток күшін тұрақты және келесі шамаға тең деп санауға болады

$$I_C = \frac{\Delta q}{\tau}. \quad (21) \quad (0.5 \text{ ұпай})$$

Оны (19) теңдеуге қоя отырып және де вакуумдық диодтың вольтамперлік сипаттамасының формуласын қолдана отырып, I_R -ге қатысты теңдеуді айқын емес түрде аламыз.

$$U_0 = \left(\frac{I_R}{A} \left(1 + \frac{T}{\tau} \right) \right)^{2/3} + I_R R. \quad (22) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Сандық әдістермен (өлшемсіз шамаларға келтіргенде, $AR\sqrt{U_0} \approx 1$ екеніне назар аударуға болады!) жауапты аламыз

$$I_R = 0.296 \frac{U_0}{R} = 6.5 \text{ мА}. \quad (23) \quad (0.5 \text{ ұпай})$$

Термоэлектрондық эмиссия

3.7. Сыртқы электр өрісі үдеткіш кернеуге байланысты тұрақты:

$$E = V/L, \quad (24) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

онда, өріс жағынан электронға әсер ететін күш те тұрақты болады:

$$F = eE. \quad (25) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Электронды 0 нүктесінен z нүктесіне ауыстыру бойынша (25) күшпен атқарылатын жұмыс

$$W = Fz. \quad (26) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Катодтан z қашықтықта электронға оның бейнесі тартылыс күшімен әсер етеді

$$F_{\text{im}}(z) = -\frac{ke^2}{(2z)^2}. \quad (27) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

$z = z_0$ нүктесінде, бұл өзара әсерлесу күші, қос электрлік қабаттың тұрақты күшімен "ұжысдстырылады"

$$F_0 = F_{\text{im}}(z = z_0) = -\frac{ke^2}{(2z_0)^2}. \quad (28) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

$0 \leq z \leq z_0$ кезеңінде (28) күшпен атқарылатын жұмыс келесі шамаға тең

$$W_0 = F_0 z_0 = -\frac{ke^2}{4z_0}. \quad (29) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Электростатикалық кескіннің күшіне байланысты электронды жылжыту үшін атқарылған жұмысты интегралдаймыз :

$$W_{\text{im}} = \int_{z_0}^z F_{\text{im}}(z) dz. \quad (30) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

(30) интегралды есептеу, келесі нәтижені береді

$$W_{\text{im}} = \frac{ke^2}{4z} - \frac{ke^2}{4z_0}. \quad (31) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

(26), (29) және (31) нәтижелерді қосамыз:

$$W(z) = W + W_0 + W_{\text{im}}. \quad (32) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Соңғы жауап

$$W(z) = \frac{eVz}{L} + \frac{ke^2}{4z} - \frac{ke^2}{2z_0}. \quad (33) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

3.8. (33) функцияның максимумын табу үшін оның туындысын нөлге теңестіреміз:

$$\frac{dW(z)}{dz}(z = z_1) = 0. \quad (34) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Бұдан

$$z_1 = \sqrt{\frac{keL}{4V}}. \quad (35) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

Нәтижесінде, үдеткіш кернеумен және баяулататын кескінмен өзара әрекеттесуіне байланысты, электрон анодқа жақындаған кезде z қашықтық z_1 -ден үлкен болғанша жылдамдығын төмендетеді, осылайша үдеткіш кернеудің әрекеті электронның катодпен әрекеттесуінен басым болады. Бұл дегеніміз

$$z_1 \leq L, \quad (36) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

бұдан қажетті минималды кернеуді табуға болады:

$$V_{\text{min}} = \frac{e}{16\pi\epsilon_0 L} = 3.6 \cdot 10^{-8} \text{ В}. \quad (37) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Бұл шешім, (25) және (27) ескере отырып, (36) шарттан келесі шарттың орындалу керектігіне ұқсас

$$|F| \geq |F_{\text{im}}|. \quad (38) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Жоғарыда алынған теңдікті (29)-ға қою бізге дәл сол (37)-ші жауапты береді. Мұндай кернеуден жоғары электрондар, кулондық тартылыс күші сыртқы электр өрісімен байланысты күшке қарағанда аз болған жайдайда, анодқа жақындаған сайын қозғалыс процесінде кескіннің болуына байланысты қозғалыстың баяулау аймағынан үдеу аймағына ауыса алады.

3.9. Электр өрісінің биіктікпен өзгеруі кеңістіктік зарядтардың болуымен байланысты; мұны Гаусс теоремасымен сипаттауға болады. Ауданы S және қалыңдығы Δz жұқа диск үшін электр өрісінің ағыны

$$\Delta\Phi = E(z + \Delta z)S - E(z)S. \quad (39) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Екінші жағынан, Гаусс теоремасына сәйкес, бұл ағын диск ішіндегі зарядқа пропорционал:

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta q}{\varepsilon_0}, \quad (40) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

ол заряд келесі шамаға тең

$$\Delta q = -neS\Delta z. \quad (41) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

(39)-(41) біріктіре отырып, келесі нәтижеге қол жеткіземіз

$$\frac{\Delta E(z)}{\Delta z} = -\frac{ne}{\varepsilon_0}. \quad (42) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

3.10. $\varphi(z)$ берілген потенциал үшін электронға белгілі бір кинетикалық энергия сәйкес келеді:

$$\frac{mv^2(\varphi)}{2} = e\varphi. \quad (43) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Бұдан

$$v(\varphi) = \sqrt{\frac{2e\varphi}{m}}. \quad (44) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

3.11. j ток тығыздығы z биіктігіндегі бірлік аудан арқылы өтетін электрондар санына тең:

$$j = \frac{\Delta q}{S\Delta t}. \quad (45) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Келесі шаманы жаза отырып

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{v}, \quad (46) \quad (0.1 \text{ ұпай})$$

және (41)-ді ескере отырып («минус» таңбасын ескермеуге болады, өйткені ол тек ток күшінің бағытын ғана көрсетеді), онда

$$j = nev, \quad (47) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

(44)-ті қолдан отырып, келесі жауапқа қол жеткіземіз

$$n(\varphi) = \frac{j}{e} \sqrt{\frac{m}{2e\varphi}}. \quad (48) \quad (0.3 \text{ ұпай})$$

3.12. Енді, потенциал анықтамасын қолдана отырып

$$E(z) = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}, \quad (49) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

және де (42)-ші дифференциалдық жуықтауды қолдана отырып, оны (48)-бен бірге (49)-ға қоя отырып, екінші ретті дифференциалдық теңдеу аламыз:

$$\frac{d^2\varphi}{dz^2} = \frac{j}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e\varphi}}. \quad (50) \quad (0.3 \text{ ұпай})$$

$\varphi(z)$ тәуелділігін өя отырып, келесі теңдікті аламыз

$$\alpha(\alpha - 1) \cdot \frac{V}{L^\alpha} \cdot z^{\alpha-2} = \frac{j}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2eV}} \left(\frac{z}{L}\right)^{-\alpha/2}. \quad (51) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Бұл теңдеу z биіктігінің барлық диапазонында орынды болуы керек, яғни коэффициенттің мәні

$$\alpha = \frac{4}{3} \quad (52) \quad (0.5 \text{ ұпай})$$

(51)-ші теңдеудегі z -тен құтылуға мүмкіндік береді.

3.13. (51)-ші теңдеуді j -ға қатысты түрлендіре отырып, келесі теңдеуді аламыз

$$j = \frac{4\varepsilon_0}{9L^2} \sqrt{\frac{2e}{m}} V^{3/2}. \quad (53)$$

Бұл теңдеу Чайлд–Лангмюр–Богуславскийдің үштен екі дәрежелі заңы ретінде де белгілі. Сонымен, келесі теңдікті аламыз

$$C = \frac{4\varepsilon_0}{9L^2} \sqrt{\frac{2e}{m}} = 2.33 \cdot 10^{-2} \text{ A}/(\text{B}^2 \cdot \text{m}^2), \quad (54) \quad (0.3 \text{ ұпай})$$

$$\beta = 3/2. \quad (55) \quad (0.2 \text{ ұпай})$$

Негізсіз β -ны "сәтті" таңдау (тапсырманың екінші бөлігіне байланысты) бұл жауап үшін ұпай жинауға әкелмейтініне назар аударыңыз!

№	Мазмұны	Ұпайлар
3.1	Формула (1): $\varepsilon = h\nu$	0,1
	Формула (2): $\nu = c/\lambda$	0,2
	Формула (3): $\varepsilon > A$	0,1
	Формула (4): $\lambda_0 = \frac{hc}{A}$	0,1
	(4)-тегі сандық жауап: $\lambda_0 = 332 \text{ нм}$	0,2
3.2	Формула (5): $\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{I_0}{e}$	0,2
	Формула (6): $W = \frac{\Delta N}{\Delta t} \varepsilon$	0,2
	(7)-дегі сандық жауап: $W = 23 \text{ мкВт}$	0,1
3.3	Формула (8): $\varepsilon = A + K$	0,1
	Формула (9): $K + eV_0 = 0$	0,2
	Формула (10): $V_0 = \frac{hc/\lambda - A}{-e}$	0,1
	(10)-дағы сандық жауап: $V_0 = -2 \text{ В}$	0,1
3.4	Формула (11): $K_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2}$	0,1
	Формула (12): $v_{\max} = \sqrt{\frac{2eV_0}{m}}$	0,1
	(12)-дегі сандық жауап: $v_{\max} = 838.7 \text{ км/с}$	0,1
3.5	Обоснование (13): $\Delta I_R \ll I_R$	0,2
	Формула (14): $\frac{\Delta I_R}{I_R} = \frac{\Delta U_C}{U_C}$	0,2
	Формула (15): $U_C = I_R R$	0,1
	Формула (16): $\Delta U_C = \frac{\Delta q}{C}$	0,1
	Формула (17): $\frac{\Delta q}{T} = I_R$	0,2
	Формула (18): $\frac{\Delta I_R}{I_R} = \frac{T}{CR}$	0,3
	(18)-дегі сандық жауап: $\frac{\Delta I_R}{I_R} = 10^{-2}$	0,1
3.6	Формула (19): $U_0 = U(I_D) + I_R R$	0,1
	Формула (20): $I_D = I_R + I_C$	0,2
	Формула (21): $I_C = \frac{\Delta q}{\tau}$	0,5
	Формула (22): $U_0 = \left(\frac{I_R}{A} \left(1 + \frac{T}{\tau} \right) \right)^{2/3} + I_R R$	0,2
	(23)-тегі сандық жауап: $I_R = 6.5 \text{ мА}$	0,5
3.7	Формула (24): $E = V/L$	0,1
	Формула (25): $F = eE$	0,1
	Формула (26): $W = Fz$	0,1
	Формула (27): $F_{\text{im}}(z) = -\frac{ke^2}{(2z)^2}$	0,1
	Формула (28): $F_0 = -\frac{ke^2}{(2z_0)^2}$	0,1
	Формула (29): $W_0 = -\frac{ke^2}{4z_0}$	0,1
	Формула (30): $W_{\text{im}} = \int_{z_0}^z F_{\text{im}}(z) dz$	0,1

	Формула (31): $W_{im} = \frac{ke^2}{4z} - \frac{ke^2}{4z_0}$	0,2	
	Формула (32): $W(z) = W + W_0 + W_{im}$	0,1	
	Формула (33): $W(z) = \frac{eVz}{L} + \frac{ke^2}{4z} - \frac{ke^2}{2z_0}$	0,2	
3.8	Формула (34) немесе (38): $\frac{dW(z)}{dz} (z = z_1) = 0$ немесе $ F \geq F_{im} $	0,2	0,6
	Формула (35): $z_1 = \sqrt{\frac{keL}{4V}}$	0,1	
	Формула (36): $z_1 \leq L$	0,1	
	Формула (37): $V_{min} = \frac{e}{16\pi\epsilon_0 L}$	0,1	
	(37)-дегі сандық жауап: $V_{min} = 3.6 \cdot 10^{-8}$ В	0,1	
3.9	Формула (39): $\Delta\Phi = E(z + \Delta z)S - E(z)S$	0,2	0,7
	Формула (40): $\Delta\Phi = \frac{\Delta q}{\epsilon_0}$	0,1	
	Формула (41): $\Delta q = -neS\Delta z$	0,2	
	<i>Минус жоғалтылса</i>	-0,1	
	Формула (42): $\frac{\Delta E(z)}{\Delta z} = -\frac{ne}{\epsilon_0}$	0,2	
3.10	Формула (43): $\frac{mv^2(\varphi)}{2} = e\varphi$	0,2	0,3
	Формула (44): $v(\varphi) = \sqrt{\frac{2e\varphi}{m}}$	0,1	
3.11	Формула (45): $j = \frac{\Delta q}{S\Delta t}$	0,2	0,8
	Формула (46): $\Delta t = \frac{\Delta z}{v}$	0,1	
	Формула (47): $j = nev$	0,2	
	Формула (48): $n(\varphi) = \frac{j}{e} \sqrt{\frac{m}{2e\varphi}}$	0,3	
3.12	Формула (49): $E(z) = -\frac{\partial\varphi}{\partial z}$	0,2	1,2
	Формула (50): $\frac{d^2\varphi}{dz^2} = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2e\varphi}}$	0,3	
	Формула (51): $\alpha(\alpha - 1) \cdot \frac{v}{L^\alpha} \cdot z^{\alpha-2} = \frac{j}{\epsilon_0} \sqrt{\frac{m}{2eV}} \left(\frac{z}{L}\right)^{-\alpha/2}$	0,2	
	Сандық жауап (52): $\alpha = \frac{4}{3}$	0,5	
3.13	Формула (54): $C = \frac{4\epsilon_0}{9L^2} \sqrt{\frac{2e}{m}}$	0,2	0,5
	(54)-тегі сандық жауап: $C = 2.33 \cdot 10^{-2}$ А/(В ² · м ²)	0,1	
	<i>Өлшемі дұрыс көрсетілмеген</i>	-0,1	
	Сандық жауап (55): $\beta = 3/2$	0,2	
Барлығы		10,0	